

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**MANUEL JESÚS MANRÍQUEZ FIGUEROA**

**COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DA MADEIRA DEVIDOS À TEMPERATURA**

Florianópolis  
2012



MANUEL JESÚS MANRÍQUEZ FIGUEROA

**COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DA MADEIRA DEVIDOS À TEMPERATURA**

Tese submetida ao programa Pós-Graduação em  
Engenharia Civil - PPGEC da Universidade  
Federal de Santa Catarina para obtenção do  
Grau de Doutor em Engenharia Civil.  
Orientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Poliana Dias de Moraes

Florianópolis  
2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária  
da  
Universidade Federal de Santa Catarina

M285c Manríquez Figueroa, Manuel Jesús

Coefficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura [tese] / Manuel Jesús Manríquez Figueroa; orientadora, Poliana Dias de Moraes. Florianópolis, SC, 2012.

259 p.: il., grafs., tabs.

Tese(doutorado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Resistência de materiais. 3. Madeira. I. Moraes, Poliana Dias de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

MANUEL JESÚS MANRÍQUEZ FIGUEROA

**COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DA MADEIRA DEVIDOS À TEMPERATURA**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

---

Prof. Ph.D. Roberto Caldas de Andrade Pinto – Coordenador do PPGEC

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Poliana Dias de Moraes – Orientadora

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Carlito Calil Junior USP-EESC

---

Prof. Dr. Valdir Pignatta e Silva USP- Escola Politécnica

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Ângela do Valle. Pós ARQ-UFSC

---

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio. Jr. PPGEC-UFSC

---

Prof. Dr. Luis Alberto Gómez. ECV-UFSC



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas bênçãos recebidas e por me dar forças para não desistir deste trabalho;

Aos meus pais Roberto e Juana, aos meus irmãos Gladys, Roberto, Jaime e Luis que, a pesar da distância estiveram sempre muito próximos;

A Juan Reyes Rodriguez (*in memoriam*) e Clemira Saavedra Cortes, pela ajuda e carinho;

À Prof. Poliana Dias de Moraes, por ter recebido este peregrino; pois além de uma excelente orientadora, pela amizade, paciência e disponibilidade em todas as etapas do trabalho;

Aos professores Carlos Alberto Szücs e Ângela do Valle, pela amizade, ajuda e agradável convivência no GIEM;

Em especial ao grande amigo Ronan Gustavo Melo, aluno do Curso de Engenharia Civil, pela amizade, ajuda e colaboração na realização deste trabalho;

À minha amiga Aline Sardá, pela amizade, de quem recebi grande carinho, valiosa ajuda e indispensável auxílio na execução da etapa experimental no laboratório;

Aos bolsistas de iniciação científica: Luana, Thaini, Thuyton, Hudson, Giancarlo, Lucas, pela cooperação, amizade e convivência durante muitos anos no GIEM.

Aos companheiros de Pós-graduação Daniela, Mario, Viviane, Daniel, Lourenço, pela amizade e contato agradável, pela ajuda mútua no desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa;

Ao Departamento de Engenharia em Construção da Umag: Raúl Gallardo pela amizade, aos professores Yasna Segura, Homero Villegas;

À Universidade de Magallanes pelo suporte financeiro;

À Capes pela bolsa de estudos e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo financiamento dos equipamentos para esta pesquisa.





*“Se eu fosse esperar que as pessoas fizessem minhas ferramentas e tudo o mais para mim, eu nunca teria feito nada”.* Sir Isaac Newton.



*À minha esposa Mila e filhas Francisca Ysabelle  
e Ignacia Estefania, pelo amor, incentivo  
e compressão em todos os momentos.*



## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>13</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>19</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>21</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>23</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>26</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>29</b>
<b>SÍMBOLOS GREGOS .....</b>	<b>31</b>
<b>ABREVIATURAS.....</b>	<b>31</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>33</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	37
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	37
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	38
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>39</b>
2.1 ASPECTOS ANATÔMICOS .....	39
2.1.1 Estrutura e ultraestrutura da madeira.....	40
2.1.2 Camadas da parede celular.....	41
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS MADEIRAS .....	42
2.2.1 Resinosas .....	42
2.2.2 Folhosas.....	43
2.3 CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES <i>Pinus spp</i> e <i>Eucalytus spp</i> 44	
2.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA .....	46
2.4.1 Celulose .....	48
2.4.2 Hemicelulose.....	49
2.4.3 Lignina.....	50
2.5 PROPRIEDADES DA MADEIRA .....	51

2.5.1	<i>Teor de umidade.....</i>	52
2.5.2	<i>Massa específica .....</i>	54
2.5.3	<i>Contração e inchamento da madeira .....</i>	55
<b>2.6</b>	<b>DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA .....</b>	<b>58</b>
2.6.1	<i>Alterações das características da madeira devido à temperatura 61</i>	
2.6.2	<i>Conclusões parciais .....</i>	63
<b>2.7</b>	<b>INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE OS POLÍMEROS DA MADEIRA .....</b>	<b>63</b>
2.7.1	<i>Degradação térmica da celulose.....</i>	64
2.7.2	<i>Degradação térmica da hemicelulose .....</i>	65
2.7.3	<i>Degradação térmica da lignina .....</i>	66
2.7.4	<i>Conclusões parciais .....</i>	68
<b>2.8</b>	<b>TRANSIÇÃO VÍTREA DOS POLÍMEROS DA MADEIRA .....</b>	<b>69</b>
2.8.1	<i>Fatores que influenciam a transição vítrea dos polímeros da madeira 71</i>	
2.8.2	<i>Conclusões parciais .....</i>	71
<b>2.9</b>	<b>INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....</b>	<b>72</b>
2.9.1	<i>Resistência à compressão paralela às fibras .....</i>	74
2.9.2	<i>Resistência à tração paralela às fibras .....</i>	76
2.9.3	<i>Resistência à tração perpendicular às fibras .....</i>	77
2.9.4	<i>Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras .....</i>	78
2.9.5	<i>Resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras 79</i>	
2.9.6	<i>Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras .....</i>	80
2.9.7	<i>Módulo de elasticidade à flexão.....</i>	81
2.9.8	<i>Módulo de ruptura na flexão.....</i>	83
2.9.9	<i>Conclusões parciais .....</i>	83
<b>2.10</b>	<b>ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ENSAIO PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA A FRIO E A QUENTE .....</b>	<b>84</b>
2.10.1	<i>Caracterização da madeira em frio .....</i>	84
2.10.2	<i>Caracterização da madeira a quente .....</i>	94
2.10.3	<i>Conclusões preliminares .....</i>	95
<b>2.11</b>	<b>CRITÉRIOS DE NORMA PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DA MADEIRA .....</b>	<b>95</b>
2.11.1	<i>Norma americana NDS (2005).....</i>	97
2.11.2	<i>Norma Chilena NCh 1198 (2006).....</i>	100
2.11.3	<i>Norma NBR 7190:1997.....</i>	102

---

2.11.4	<i>Norma europeia EN 1995 1-2 (2005)</i> .....	104
2.11.5	<i>Conclusões parciais</i> .....	106
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>107</b>
<b>3.1</b>	<b>AMOSTRAS E CORPOS DE PROVA</b> .....	<b>107</b>
<b>3.2</b>	<b>AQUECIMENTO DOS CORPOS DE PROVA</b> .....	<b>108</b>
<b>3.3</b>	<b>ENSAIOS MECÂNICOS</b> .....	<b>109</b>
3.3.1	<i>Ensaio de compressão paralela às fibras</i> .....	110
3.3.2	<i>Ensaio de flexão estática</i> .....	112
3.3.3	<i>Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras</i> .....	114
3.3.4	<i>Ensaio de embutimento paralelo às fibras</i> .....	117
3.3.5	<i>Ensaio de embutimento perpendicular às fibras</i> .....	119
<b>3.4</b>	<b>DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NO FINAL DE ENSAIO</b> .....	<b>121</b>
<b>3.5</b>	<b>DETERMINAÇÃO DOS VALORES CARACTERÍSTICOS DE RESISTÊNCIA</b> .....	<b>122</b>
<b>3.6</b>	<b>METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>123</b>
3.6.1	<i>Determinação da resistência normalizada</i> .....	123
3.6.2	<i>Análise da resistência normalizada à temperatura ambiente e a altas temperaturas</i> .....	123
3.6.3	<i>Análise da resistência normalizada em função da massa específica</i> .....	124
<b>3.7</b>	<b>COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS</b> .....	<b>125</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>126</b>
<b>4.1</b>	<b>TEOR DE UMIDADE</b> .....	<b>126</b>
<b>4.2</b>	<b>ALTERAÇÕES DA MADEIRA CAUSADAS PELO AQUECIMENTO</b> .....	<b>127</b>
<b>4.3</b>	<b>FALHAS OCORRIDAS DURANTE OS ENSAIOS MECÂNICOS</b> .....	<b>130</b>
4.3.1	<i>Falhas dos corpos de prova à compressão paralela às fibras</i>	130
4.3.2	<i>Falhas dos corpos de prova à flexão</i> .....	132
4.3.3	<i>Falhas dos corpos de prova ao cisalhamento paralelo às fibras</i> 133	
4.3.4	<i>Falhas dos corpos de prova ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras</i> .....	134

<b>4.4 INFLUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA E DA TEMPERATURA DE ENSAIO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA .....</b>	<b>137</b>
4.4.1 <i>Análise do Pinus taeda.....</i>	137
4.4.2 <i>Análise do Eucalyptus saligna .....</i>	139
4.4.3 <i>Análise do Schizolobium amazonicum .....</i>	140
4.4.4 <i>Análise comparativa entre o Pinus taeda e Schizolobium amazonicum.....</i>	142
<b>4.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA .....</b>	<b>144</b>
4.5.1 <i>Resistência mecânica à compressão paralela às fibras .....</i>	144
4.5.2 <i>Resistência mecânica à flexão estática .....</i>	145
4.5.3 <i>Resistência mecânica ao cisalhamento paralelo às fibras .....</i>	146
4.5.4 <i>Resistência mecânica ao embutimento paralelo às fibras.....</i>	147
4.5.5 <i>Resistência mecânica ao embutimento perpendicular às fibras</i>	148
<b>4.6 PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA A TEMPERATURAS ELEVADAS .....</b>	<b>149</b>
4.6.1 <i>Amostra .....</i>	149
4.6.2 <i>Corpos de prova.....</i>	150
4.6.3 <i>Determinação do tempo de aquecimentos dos corpos de prova</i>	151
4.6.4 <i>Procedimento de ensaio mecânico .....</i>	152
4.6.5 <i>Determinação da resistência mecânica.....</i>	152
4.6.6 <i>Determinação do teor de umidade dos corpos de prova.....</i>	153
4.6.7 <i>Metodologia de análise dos resultados .....</i>	153
<b>4.7 VALORES MÉDIOS E CARACTERÍSTICOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA .....</b>	<b>154</b>
<b>4.8 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE AS RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS NORMALIZADAS .....</b>	<b>154</b>
4.8.1 <i>Resistências características à compressão paralela às fibras normalizadas .....</i>	155
4.8.2 <i>Resistências características à flexão estática normalizadas..</i>	156
4.8.3 <i>Resistências características ao cisalhamento paralelo às fibras normalizadas .....</i>	157
4.8.4 <i>Resistências características ao embutimento paralelo às fibras normalizadas .....</i>	158
4.8.5 <i>Resistências características ao embutimento perpendicular às fibras normalizadas.....</i>	159



<b>4.9 AJUSTE DAS RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS NORMALIZADAS .....</b>	<b>160</b>
4.9.1 <i>Resistência característica à compressão paralela às fibras ..</i>	<i>160</i>
4.9.2 <i>Resistência característica à flexão estática .....</i>	<i>163</i>
4.9.3 <i>Valores característicos ao cisalhamento paralelo às fibras ..</i>	<i>164</i>
4.9.4 <i>Resistência característica ao embutimento paralelo às fibras</i>	<i>167</i>
4.9.5 <i>Resistência característica ao embutimento perpendicular às fibras</i>	<i>170</i>
<b>4.10 COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA .....</b>	<b>172</b>
4.10.1 <i>Coefficientes de modificação por propriedade da madeira ....</i>	<i>175</i>
4.10.2 <i>Coefficientes de modificação mínimos globais e as normas NDS (2005) e NCh 1198 (2006).....</i>	<i>177</i>
4.10.3 <i>Coefficientes de modificação mínimos globais e EN 1995 1-2 (2005)</i>	<i>179</i>
4.10.4 <i>Proposta dos coeficientes de modificação para espécies resinosas e folhosas.....</i>	<i>180</i>
4.10.5 <i>Conclusões parciais .....</i>	<i>181</i>
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>183</b>
<b>6 BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>187</b>
<b>7 APÊNDICES.....</b>	<b>216</b>



## RESUMO

As propriedades mecânicas da madeira à temperatura ambiente estão relacionadas, principalmente, com a densidade, a anatomia e o teor de umidade desse material. Quando ela é submetida a altas temperaturas, essas propriedades são completamente alteradas. Nessa situação, a resistência mecânica, as propriedades térmicas e a rigidez são afetadas devido à transição vítrea e à degradação térmica dos polímeros da madeira. Neste trabalho é avaliada a influência da temperatura nas resistências: à compressão paralela às fibras; à flexão estática; ao cisalhamento e ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras, para as espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum*, oriundas de florestas plantadas do estado de Santa Catarina, Paraná e Região Amazônica, quando submetidas a temperaturas entre 20 °C e 230 °C. Foram ensaiadas três amostras compostas por 2025 corpos de prova: 750 de *Pinus taeda*, 750 de *Eucalyptus saligna* e 525 de *Schizolobium amazonicum*, com valor médio de massa específica de 429 kg/m<sup>3</sup>, 778 kg/m<sup>3</sup> e 372 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, com teor de umidade de 12% para as três amostras. Foram determinados coeficientes de modificação para essas propriedades mecânicas que consideram o efeito da temperatura, tanto para folhosas quanto para resinosas, propondo-se coeficientes de modificação aplicáveis à NBR 7190:1997, a fim de que seja incorporado no desenvolvimento de projetos de estruturas de madeira submetidas a temperaturas elevadas. A resistência mecânica da madeira está relacionada de forma inversa à temperatura. Como nesse caso em estudo a resistência diminui, é necessário considerar coeficientes de modificação para o dimensionamento de estruturas de madeira que levem em conta os efeitos da temperatura, sejam esses efeitos oriundos de incêndio ou fatores climáticos. Os resultados mostram uma redução significativa da resistência mecânica causada pelo aumento da temperatura. Os coeficientes de modificação em função da temperatura, isto é, o da resistência à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras e à flexão para o *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum*, foram determinados a partir dos valores característicos normalizados.

**Palavras-chave:** Resistência mecânica, Temperatura, Madeira, Coeficientes de modificação.



## ABSTRACT

The mechanical properties of wood at room temperature are mainly related to the density, anatomy and moisture content of the material. When it is subjected to high temperatures, these properties are completely altered. In this situation, the mechanical strength, stiffness and thermal properties are affected due to the glass transition temperature and to thermal degradation of the polymers of the timber. The study is to determine of the influence of temperature on the compressive strength parallel to grain, static bending, shear and embedding parallel and perpendicular to grain, for the species *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* and *Schizolobium amazonicum*, coming from planted forests in the state of Santa Catarina, Parana and Amazon region, when subjected to temperatures between 20 and 230 °C. The three samples composed by 2025 clear specimens: 750 *Pinus taeda*, 750 *Eucalyptus saligna* and 525 of *Schizolobium amazonicum* with average mass density of 429 kg/m<sup>3</sup>, 778 kg/m<sup>3</sup> and 372 kg/m<sup>3</sup>, respectively, moisture content of 12% for the three samples were tested. Modification coefficients were determined for these mechanical properties considering the effects of temperature, both in hardwoods and softwoods for proposing a coefficient modification applicable to NBR 7190:1997, so that development is incorporated in the design of structures timber subjected to elevated temperatures. The mechanical strength of the wood is inversely related to temperature. As the resistance decreases, it is necessary to consider modification coefficients for the design of wooden structures that take into account the effects of temperature, either originating from fire or climatic factors. The results show a significant reduction in strength caused by increased temperature. The coefficients as function of temperature change of the resistance to compression, the shear, the embedding and parallel and perpendicular to grain to bending for *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* and *Schizolobium amazonicum* were determined from the standard characteristic values.

**Keywords:** Strength, Temperature, Wood, Modification coefficients.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Seção carbonizada da madeira -----	36
Figura 2: Aspectos macroscópicos da madeira (IPT, 1986).-----	40
Figura 3: Estrutura da parede celular (IPT, 1986).-----	41
Figura 4: Estrutura celular de resinosas (KOLMANN; COTÊ, 1968).-----	43
Figura 5: Estrutura celular de folhosas (KOLMANN; CÔTÉ, 1968).-----	44
Figura 6: Principais polímeros na parede celular (MILLER, 1999).-----	47
Figura 7: Principais componentes químicos da hemicelulose (SJÖSTRÖM, 1993).-----	50
Figura 8: Principais componentes químicos da lignina (SJÖSTRÖM, 1993).-----	51
Figura 9: Eixos ortotrópicos em referencia ao plano da madeira (adaptado de STALNAKER; HARRIS, 1997).-----	52
Figura 10: Perda de água nas fibras da madeira.-----	53
Figura 11: Ligações de hidrogênio nas cadeias de celulose e atrações eletrostáticas (BODIG; JAYNE, 1993).-----	56
Figura 12: Regiões amorfas e cristalinas da celulose (BODIG; JAYNE, 1993).-----	57
Figura 13: Alterações dos componentes com a temperatura (SUNDQVIST, 2004).-----	64
Figura 14: Resíduo de lignina e celulose da madeira (BRITO; BARRICHELO, 2001).-----	66
Figura 15: Transição vítrea dos componentes da madeira.-----	70
Figura 16: Transição vítrea da lignina e hemicelulose (IRVINE, 1984).--	71
Figura 17: Compressão paralela às fibras relativa.-----	74
Figura 18: Efeito da temperatura e umidade na resistência à compressão paralela às fibras.-----	75
Figura 19: Resistência relativa à compressão paralela às fibras da madeira.-----	76
Figura 20: Resistência à tração paralela às fibras relativa.-----	77
Figura 21: Influência da temperatura na resistência à tração perpendicular às fibras.-----	78
Figura 22: Resistência ao cisalhamento paralela às fibras relativa.-----	78
Figura 23: Resistência ao embutimento paralelo às fibras relativo.-----	79
Figura 24: Resistência ao embutimento perpendicular às fibras relativo. -	80
Figura 25: Módulo de elasticidade à compressão relativa (adaptado de GERHARDS, 1982).-----	81
Figura 26: Módulo de elasticidade na flexão relativo.-----	82
Figura 27: Módulos de elasticidade à compressão paralela às fibras (adaptado de GREEN et al., 1999).-----	82
Figura 28: Gradientes de térmicos.-----	96

Figura 29: Forno de aquecimento dos corpos de prova. -----	108
Figura 30: Câmara térmica. -----	109
Figura 31: Corpos de prova de compressão paralela às fibras. -----	111
Figura 32: Dispositivo de ensaio à compressão paralela às fibras. -----	111
Figura 33: Diagrama força $\times$ deslocamento. -----	112
Figura 34: Corpo de prova de flexão estática. -----	113
Figura 35: Dispositivo de flexão estática. -----	113
Figura 36: Diagrama força $\times$ deformação específica. -----	114
Figura 37: Corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras. -----	115
Figura 38: Dispositivo de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras. ----	116
Figura 39: Diagrama de força $\times$ deslocamento. -----	116
Figura 40: Corpo de prova de embutimento paralelo às fibras. -----	118
Figura 41: Dispositivo de ensaio ao embutimento paralelo às fibras. ----	118
Figura 42: Diagrama de força $\times$ deslocamento. -----	119
Figura 43: Corpo de prova de embutimento perpendicular às fibras. ----	120
Figura 44: Dispositivo de ensaio ao embutimento paralelo às fibras. ----	121
Figura 45: Teor de umidade dos corpos de prova após os ensaios. -----	127
Figura 46: Alterações da coloração dos corpos de prova. -----	128
Figura 47: Saída de resina e fendas nos topos dos corpos de prova. ----	129
Figura 48: Rachaduras e combustão nos topos dos corpos de prova. ----	130
Figura 49: Ruptura dos corpos de prova de compressão paralela às fibras de <i>Pinus taeda</i> . -----	131
Figura 50: Ruptura dos corpos de prova de compressão paralela às fibras de <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	131
Figura 51: Ruptura dos corpos de prova de flexão de <i>Pinus taeda</i> . -----	132
Figura 52: Ruptura dos corpos de prova de flexão de <i>Eucalyptus saligna</i> . 133	
Figura 53: Ruptura dos corpos de prova ao cisalhamento do <i>Pinus taeda</i> e do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	133
Figura 54: Ruptura por embutimento. -----	135
Figura 55: Ruptura por fendilhamento paralelo as fibras. -----	136
Figura 56: Ruptura por fendilhamento perpendicular às fibras do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	137
Figura 57: Ruptura por embutimento perpendicular às fibras do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	137
Figura 58: Resistência mecânica à compressão paralela às fibras. -----	145
Figura 59: Resistência mecânica à flexão estática. -----	146
Figura 60: Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. -----	146
Figura 61: Resistência ao embutimento paralelo às fibras. -----	148
Figura 62: Resistência ao embutimento perpendicular às fibras. -----	149
Figura 63: Metodologia de ensaios mecânicos a temperaturas elevadas. -	153
Figura 64: Resistências características à compressão paralela às fibras normalizadas. -----	156
Figura 65: Resistências características à flexão estática normalizadas. ---	156



Figura 66: Resistências características ao cisalhamento paralelo às fibras normalizadas. -----	157
Figura 67: Resistências características ao embutimento paralelo às fibras normalizadas. -----	158
Figura 68: Resistências características ao embutimento perpendicular às fibras normalizadas. -----	159
Figura 69: Resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do <i>Pinus taeda</i> . -----	160
Figura 70: Resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	161
Figura 71: Resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do <i>Schizolobium amazonicum</i> . -----	162
Figura 72: Resistência característica normalizada à flexão estática do <i>Pinus taeda</i> . -----	163
Figura 73: Resistência característica normalizada à flexão estática do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	164
Figura 74: Resistência característica normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras do <i>Pinus taeda</i> . -----	165
Figura 75: Resistência característica normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	166
Figura 76: Resistência característica normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras do <i>Schizolobium amazonicum</i> . -----	166
Figura 77: Resistência característica normalizada ao embutimento paralelo às fibras do <i>Pinus taeda</i> . -----	167
Figura 78: Resistência característica normalizada ao embutimento paralelo às fibras do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	168
Figura 79: Resistência característica normalizada ao embutimento paralelo às fibras do <i>Schizolobium amazonicum</i> . -----	169
Figura 80: Resistência característica normalizada ao embutimento perpendicular às fibras do <i>Pinus taeda</i> . -----	170
Figura 81: Resistência característica normalizada ao embutimento perpendicular às fibras do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	171
Figura 82: Resistência característica normalizada ao embutimento perpendicular às fibras do <i>Schizolobium amazonicum</i> . -----	172
Figura 83: Coeficientes de modificação da pesquisa e NDS (2005) -----	178
Figura 84: Coeficientes de modificação propostos comparados com -- <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
Figura 85: Coeficientes de modificação propostos, comparados com as normas EN 1995 1-2 (2005), NDS (2006) e NCh (2005). -----	179
Figura 86: Controle de temperatura dos corpos de prova. -----	258
Figura 87: Aquecimento do <i>Pinus taeda</i> . -----	259
Figura 88: Aquecimento do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	259

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas e mecânicas do <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus saligna</i> .-----	46
Tabela 2: Composição química da madeira.-----	46
Tabela 3: Fases de degradação da madeira.-----	59
Tabela 4: Alterações dos polímeros da madeira devidas à temperatura.----	67
Tabela 5: Temperatura de transição vítrea dos polímeros da madeira.-----	70
Tabela 6: Análise das normas técnicas de compressão paralela às fibras.--	87
Tabela 7: Análise das normas técnicas de flexão estática.-----	88
Tabela 8: Análise das normas técnicas de cisalhamento paralelo às fibras.	90
Tabela 9: Análise das normas técnicas de embutimento paralelo às fibras.	92
Tabela 10: Análise das normas técnicas de embutimento perpendicular às fibras.-----	93
Tabela 11: Aquecimento dos corpos de prova.-----	94
Tabela 12: Fator de modificação por faixa de temperatura da NDS (2005).-----	98
Tabela 13: Valores de referência e ajuste para projeto.-----	99
Tabela 14: Aumento e diminuição dos os valores de resistência para cada 1 °C de aumento ou diminuição de temperatura da madeira.-----	101
Tabela 15: Coeficientes de modificação da NCh 1198.-----	101
Tabela 16: Quantidade de corpos de prova por nível de temperatura.----	108
Tabela 17: Tempo de aquecimento dos corpos de prova.-----	109
Tabela 18: Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de compressão paralela às fibras à temperatura ambiente.-----	110
Tabela 19: Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de flexão estática à temperatura ambiente.-----	112
Tabela 20: Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras à temperatura ambiente.-----	115
Tabela 21: Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de embutimento paralelo às fibras à temperatura ambiente.-----	117
Tabela 22: Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de embutimento perpendicular às fibras à temperatura ambiente.-----	120
Tabela 23: Número de corpos de prova fendilhados.-----	135
Tabela 24: Comparação dos valores médios das resistências normalizadas do <i>Pinus taeda</i> .-----	138
Tabela 25: Comparação dos valores médios das resistências normalizadas do <i>Eucalyptus saligna</i> .-----	140
Tabela 26: Comparação dos valores médios das resistências normalizados do <i>Schizolobium amazonicum</i> .-----	141
Tabela 27: Comparação dos valores médios das resistências normalizadas entre <i>Pinus taeda</i> e <i>Schizolobium amazonicum</i> .-----	143

Tabela 28: Valores médios e valores característicos da resistência mecânica à temperatura ambiente. -----	154
Tabela 29: Coeficientes de modificação ajustados. -----	174
Tabela 30: Coeficientes de modificação à compressão paralela às fibras. -----	175
Tabela 31: Coeficientes de modificação à flexão estática. -----	176
Tabela 32: Coeficientes de modificação ao cisalhamento -----	176
Tabela 33: Coeficientes de modificação ao embutimento -----	177
Tabela 34: Coeficientes de modificação propostos, comparados com as normas NDS (2005) e NCh 1198 (2006). -----	178
Tabela 35: Coeficiente de modificação para Resinosas e Folhosas. -----	181
Tabela 36: Valores médios de teor de umidade do <i>Pinus taeda</i> . -----	216
Tabela 37: Valores médios de teor de umidade do <i>Eucalyptus saligna</i> . --	216
Tabela 38: Valores médios de teor de umidade do <i>Schizolobium amazonicum</i> . -----	217
Tabela 39: Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do <i>Pinus taeda</i> . -----	218
Tabela 40: Resistência normalizada à flexão estática e massa específica do <i>Pinus taeda</i> . -----	220
Tabela 41: Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do <i>Pinus taeda</i> . -----	222
Tabela 42: Resistência normalizada ao embutimento paralelo às fibras e massa específica do <i>Pinus taeda</i> . -----	224
Tabela 43: Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do <i>Pinus taeda</i> . -----	226
Tabela 44: Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	228
Tabela 45: Resistência normalizada à flexão estática e massa específica do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	230
Tabela 46: Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	232
Tabela 47: Resistência normalizada ao embutimento paralelo às fibras e massa específica do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	234
Tabela 48: Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	236
Tabela 49: Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do <i>Schizolobium amazonicum</i> . -----	238
Tabela 50: Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do <i>Schizolobium amazonicum</i> . -----	240
Tabela 51: Resistência normalizada ao embutimento paralelo às e massa específica do <i>Schizolobium amazonicum</i> . -----	242
Tabela 52: Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do <i>Schizolobium amazonicum</i> . -----	244

Tabela 53: Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do <i>Pinus taeda</i> e <i>Schizolobium amazonicum</i> .-----	246
Tabela 54: Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do <i>Pinus taeda</i> e <i>Schizolobium amazonicum</i> .-----	249
Tabela 55: Resistência normalizada ao embutimento paralelo às fibras e massa específica do <i>Pinus taeda</i> e <i>Schizolobium amazonicum</i> .-----	251
Tabela 56: Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do <i>Pinus taeda</i> e <i>Schizolobium amazonicum</i> .-----	253
Tabela 57: Valores médios de resistência mecânica do <i>Pinus taeda</i> . ----	255
Tabela 58: Valores médios de resistência mecânica do <i>Eucalyptus saligna</i> . -----	255
Tabela 59: Valores médios de resistência mecânica do <i>Schizolobium amazonicum</i> .-----	256
Tabela 60: Valores característicos normalizados do <i>Pinus taeda</i> .-----	256
Tabela 61: Valores característicos normalizados do <i>Eucalyptus saligna</i> .-----	257
Tabela 62: Valores característicos normalizados do <i>Schizolobium amazonicum</i> .-----	257

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área de seção transversal ( $\text{mm}^2$ )
$a$	distância
$A_{v0}$	área seção transversal de cisalhamento ( $\text{mm}^2$ )
$b$	largura (mm)
$C_n$	coeficientes de modificação
$C_t$	coeficiente de modificação por temperatura
$d$	diâmetro (mm)
$f_{adm}$	tensões admissíveis da propriedade da madeira
$f_{c0}$	resistência a compressão paralela às fibras
$\bar{f}_{c0}$	resistência média a compressão paralela às fibras
$f_{ck}$	resistência característica à compressão paralela às fibras
$F_{co,m\acute{a}x}$	máxima força de compressão
$f'_d$	fator ajustado em função dos parâmetros
$f_d$	propriedade mecânica ajustada
$f_{dis}$	resistência de cálculo de projeto
$f_{c,12\%}$	resistência à compressão paralela às fibras corrigida a 12%
$f_{c,U\%}$	resistência à compressão paralela às fibras ao teor de umidade do ensaio
$f_{e0}$	resistência ao embutimento paralelo às fibras
$\bar{f}_{e0}$	resistência média ao embutimento paralelo às fibras
$f_{ek0}$	resistência característica ao embutimento paralelo às fibras
$f_{e90}$	resistência ao embutimento perpendicular às fibras
$\bar{f}_{e90}$	resistência média ao embutimento perpendicular às fibras
$f_{ek90}$	resistência característica ao embutimento perpendicular às fibras
$F_{e\ m\acute{a}x}$	força máxima de embutimento
$\bar{f}_{t0}$	resistência média à tração paralela às fibras
$f_{tk}$	resistência característica à tração paralela às fibras
$f_{v0}$	resistência ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_{vk}$	resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras
$F_{v0,m\acute{a}x}$	máxima força de cisalhamento paralelo às fibras
$\bar{f}_{v0}$	resistência média ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_{vk}$	resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras
$f_{wd}$	valor de cálculo da propriedade da madeira
$f_{wk}$	valor característico da resistência
$h$	largura (mm)
$K_C$	fator de redução por trabalho em conjunto

$K_D$	fator de redução por duração da carga
$K_F$	fator de conversão de forma
$K_H$	fator de redução por umidade
$K_h$	fator de redução por altura
$K_{mod}$	coeficiente de modificação
$K_{mod1}$	coeficiente parcial de modificação que leva em conta a classe de carregamento e o tipo de material empregado
$K_{mod2}$	coeficiente parcial de modificação que leva em conta a classe de umidade e o tipo de material empregado
$K_{mod3}$	coeficiente parcial de modificação que leva em conta se a madeira é de primeira ou segunda categoria
$K_r$	fator de redução por redução de área
$k_\theta$	fator de redução por temperatura
$K_\lambda$	fator de redução por tombamento
$l$	distância entre eixos dos apoios (mm)
$L_i$	limite inferior
$L_s$	limite superior
$m_e$	massa no momento do ensaio
$m_s$	massa seca
$n$	número de elementos
$P$	máxima carga aplicada (N)
$S_1, S_3$	camadas delgadas da parede celular
$S_2$	camada espessa da parede celular
$S_n$	variância da amostra
$t$	espessura (mm)
$t$	distribuição t de student
$X_d$	valor de cálculo de uma propriedade da madeira
$X_k$	propriedade característica
$\mu m$	mícron
$U$	teor de umidade
$\bar{x}$	valor médio
$T_g$	transição vítrea

## SÍMBOLOS GREGOS

$f_{FH}$	resistência à ruptura da flexão estática
$\phi$	fator de resistência
$\lambda$	fator de efeito de tempo
$\theta$	temperatura °C
$\mu$	valor característico igual a $f_k$
$\gamma_M$	fator de segurança
$\gamma_w$	coeficiente de ponderação de segurança que leva em conta o material

## ABREVIATURAS

ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
AS	Australian Standard
ASTM	American Society for Testing and Materials
BRDE	Banco Regional de Desenvolvimento de Extremo Sul
DTA	Differential Thermal Analysis
EN	Norma Europeia
ISO	International Organization Standardization
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LRFD	Load and Resistance Factor Design
LSD	Least Significant Difference
MOE	Módulo de Elasticidade na Flexão
MOR	Módulo de Ruptura
NBR	Norma Brasileira
NCh	Norma Chilena
NDS	National Design Specification
NF	Norma Francesa
PSF	Ponto de saturação das fibras
SQR	Soma dos Quadrados dos Resíduos
TGA	Thermo gravimetric Analysis





## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com evidente vocação florestal e, apesar de ter uma grande área plantada de floresta em seu território e de ser o maior produtor mundial de madeira de florestas plantadas, esse material é pouco utilizado no setor de construção civil em comparação a outros materiais. A madeira de floresta plantada tem sido aplicada em diversos segmentos, como na indústria da celulose e papel e na fabricação de móveis, e veio para ocupar a lacuna deixada pelas madeiras de mata nativa. Nesse contexto, o estado de Santa Catarina está experimentando, nos últimos anos, um novo ciclo de expansão da atividade florestal. Essa expansão ocorre devido ao aumento da capacidade instalada das indústrias de base florestal já existentes e devido à implementação de novos projetos industriais, provocando o aumento de demanda por madeiras de florestas plantadas, a valorização da madeira e, por consequência, a atividade de reflorestamento.

A Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), em seu Anuário Estatístico de 2010, apresenta os dados relativos ao ano de 2009, evidenciando que as florestas plantadas no Brasil totalizam 6,6 milhões de hectares, sendo que destes, 6,13 são plantados com os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Em Santa Catarina, estas florestas ocupam 628.655 hectares. A produção anual de madeira de florestas plantadas no Brasil é estimada em 160 milhões de metros cúbicos e atende às necessidades das indústrias de celulose, de energia, de laminados, de aglomerados e compensados (LIMA; REZENDE, 2008). O estado de Santa Catarina consome anualmente 15,6 milhões de metros cúbicos de madeira, o que equivale a 55 mil hectare/ano (Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul BRDE, 2008). Uma alternativa para o uso racional de madeiras na construção civil é a utilização de madeira oriunda de florestas plantadas. Para o uso correto dessa madeira, é necessário conhecer as suas propriedades físicas mecânicas e seu desempenho nas situações normal e excepcional, tais como temperaturas elevadas e condições de incêndio.

As propriedades mecânicas da madeira à temperatura ambiente estão relacionadas, principalmente, com a densidade, a anatomia e o teor de umidade desse material. Porém, quando ela é submetida a altas temperaturas, essas propriedades são completamente alteradas. Nessa situação, a resistência mecânica, as propriedades térmicas e a rigidez são

afetadas devido à transição vítrea e à degradação térmica dos polímeros da madeira.

Vários trabalhos foram realizados para avaliar a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira submetida a altas temperaturas (SANO, 1961; SCHAFFER, 1967; KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; PREUSSER, 1968; SCHAFFER, 1973; KNUDSON; SCHNIEWIND, 1975; OHSAWA; YONEDA, 1978; LAU; BARRETT, 1979; CHAFE, 1979; NYMAN, 1980; GERHARDS, 1982; OSTMAN, 1985; SCHAFFER, 1986; GREEN et al., 1999; MORAES, 2004; MORAES et al., 2005; PESCADOR et al., 2008; MANRÍQUEZ, 2008; MANRÍQUEZ; MORAES, 2008, 2009 a e b, 2010; FONSECA, 2009). Os trabalhos realizados indicam que a resistência mecânica da madeira está relacionada de forma inversa à temperatura, manifestando-se de duas maneiras: como efeitos temporários e como efeitos permanentes. Os temporários manifestam-se quando a madeira é aquecida por curtos períodos de tempo (entre 1 e 2 horas). Nessa situação, a resistência mecânica diminui, porém, quando o material volta à temperatura ambiente, ele recobra suas propriedades originais. Se a exposição da madeira a altas temperaturas é mantida por um período prolongado de tempo (acima de 4 horas), os efeitos são permanentes e afetam as propriedades mecânicas de três modos: causando a perda de umidade, originando tensões internas às fibras da madeira e a degradação dos componentes químicos da madeira (GERHARDS, 1982).

Algumas normas para projetos de construções em madeira apresentam critérios de dimensionamento de estruturas que consideram a redução das propriedades mecânicas desse material a temperaturas elevadas ou em situação de incêndio (NDS, 2005; NCh 1198, 2006; EN 1995 1-2, 2005; AS 1520.4, 1990). As Normas Americana NDS (2005) e Chilena NCh 1198 (2006) consideram o efeito da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira para temperaturas entre 20 °C e 70 °C. Para tal, usa-se um fator de modificação das propriedades mecânicas do material sob ação térmica. A norma americana NDS (2005) utiliza um coeficiente de modificação da resistência (coeficiente de modificação por temperatura  $C_t$ ) no caso de exposições prolongadas a temperaturas superiores às normais encontradas em situações de projeto. Os coeficientes de modificação associados à temperatura são aplicados às propriedades mecânicas de membros de madeiras em condições úmidas e secas, em faixas de temperatura entre 20 °C e 70 °C. Da mesma forma, a norma chilena NCh 1198 (2006) especifica em seu procedimento de cálculo a modificação do valor das propriedades mecânicas admissíveis para condições de serviço de uma estrutura de

madeira submetida a temperaturas superiores as do ambiente, sejam elas ocasionadas pela ação do fogo ou não. Os valores estabelecidos nessa norma aplicam-se a madeiras submetidas a temperaturas não superiores a 50 °C e aquecimentos ocasionais de curta duração a temperaturas superiores a 70 °C, para teor de umidade entre 0 e 12%. Essa norma também considera um coeficiente de modificação quando estruturas de madeira são submetidas a temperaturas inferiores a 20 °C e temperaturas negativas até -180 °C.

A norma EN 1995 1-2 (2005), a AS 1520.4 (1990) e a NBR 7190:1997 (revisão, março 2012) preveem a utilização de métodos simplificados e avançados para a determinação da resistência dos elementos estruturais em situação de incêndio. Os métodos simplificados prescrevem a determinação da seção residual da madeira a partir da taxa de carbonização e também da redução das propriedades mecânicas do material em função da geometria da seção transversal. Já os métodos avançados possibilitam a modelagem mais acurada dos fenômenos termomecânicos que ocorrem no interior da madeira sob a ação da temperatura. Porém para o uso de qualquer um dos métodos, faz-se necessário o conhecimento das propriedades termomecânicas da madeira em altas temperaturas.

A norma vigente Brasileira, NBR 7190:1997, em seu procedimento de cálculo, considera um coeficiente de modificação ( $k_{mod}$ ) a ser aplicado nas propriedades mecânicas da madeira, que é determinado em função das características da madeira, das classes de carregamento e de umidade, do tipo de material e da categoria da madeira, não sendo considerado um fator de modificação que leve em conta a influência da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira.

Considerando que, em algumas construções, os elementos estruturais são submetidos a temperaturas superiores à temperatura ambiente, sejam elas originárias de incêndio ou não, é necessário considerar a influência da temperatura na determinação da resistência de cálculo desse material.

A madeira é um material combustível e, como os demais materiais combustíveis sólidos, quando aquecida, produz gases combustíveis que, quando expostos ao calor, queimam e produzem chama. Os gases quentes e as chamas, por sua vez, aquecem a porção de madeira ainda não atingida pelo calor e promovem a liberação de mais gases inflamáveis, gerando um processo em cadeia que alimenta a combustão. A madeira, quando é submetida a uma situação de incêndio,

irá queimar. Porém, tanto a madeira quanto o carvão oriundo da combustão da primeira são isolantes térmicos e retardam o fluxo de calor para o interior do material, abrandando a velocidade da degradação térmica e retardando o avanço da frente de carbonização.

Dessa forma, quando submetidos ao fogo, os elementos estruturais da madeira exibem em seus interiores, após a camada carbonizada, uma estreita camada aquecida, cujas propriedades mecânicas são afetadas pelo calor, e um núcleo inalterado (Manríquez e Moraes, 2009). A seção interior da madeira se mantém à baixa temperatura perto da zona queimada, conservando grande parte das suas propriedades físicas. Essas características colaboram positivamente para a capacidade resistente da madeira ao fogo, mesmo após ter sido exposta a elevadas temperaturas (**Figura 1**).



**Figura 1:** Seção carbonizada da madeira

No Brasil, e mesmo em outras regiões do mundo, as temperaturas podem atingir a valores de aproximadamente 50 °C e 60 °C nos telhados. Lamberts (1988) afirma que o teto é o componente do edifício mais exposto ao clima externo. Algumas construções podem alcançar altas temperaturas devido à radiação solar em telhados. Níveis de temperaturas alcançados nos telhados são funções de muitas variáveis tais como: tempo de exposição ao sol, estação climática, cobertura de nuvens, velocidade do vento, cor dos telhados, orientação, taxa de ventilação, tipo de isolamento e espessura de revestimento. Medições reais de temperaturas no telhado mostram que os elementos estruturais no telhado chegam facilmente a valores superiores a 66 °C (ARMELIN; CHERRY, 2004).

As pesquisas realizadas por Manríquez (2008); Pescador et al. (2008); Manríquez e Moraes (2008); Manríquez e Moraes (2009 a e b); Manríquez e Moraes (2010) mostraram a necessidade de se considerar o

efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira no intervalo de 20 °C a 230 °C. Para faixas de temperatura de 20 °C a 70 °C, verifica-se que a redução apresentada nas propriedades estudadas é próxima aos fatores de redução propostos pelas normas NDS (2005) e NCh 1198 (2006).

A literatura técnica atual mostra a necessidade de um maior aprofundamento da pesquisa com relação à quantificação desses fatores de redução e à questão da generalização desses parâmetros para folhosas e resinosas.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira quando submetida a temperaturas entre 20 °C e 230 °C, determinando coeficientes de modificação para as propriedades estudadas tanto para folhosas quanto para resinosas.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos associados a esta pesquisa são:

- a) avaliar a influência da temperatura sobre as resistências à compressão, à flexão, ao cisalhamento paralelo às fibras e ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras para as espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum*;
- b) propor uma metodologia de ensaio para a obtenção do coeficiente de modificação para cada propriedade estudada;
- c) avaliar a influência da massa específica e da temperatura na resistência mecânica da madeira;
- d) obter coeficientes de modificação decorrentes da influência da elevação de temperatura na resistência mecânica da madeira, para cada propriedade estudada;

- e) propor um coeficiente de modificação para ser incorporado pela NBR 7190:1997 nos projetos de estruturas de madeira submetidas a temperaturas elevadas.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Este trabalho encontra-se organizado na seguinte sequência: Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões, Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros, Referências Bibliográficas e Apêndice.

O capítulo de Revisão Bibliográfica aborda aspectos gerais relacionados com anatomia, ultraestrutura, classificação e composição química da madeira; degradação térmica deste material e de seus polímeros; alterações das características da madeira em função da temperatura; influência da temperatura nas propriedades da madeira e critérios de norma para a determinação da resistência de cálculo da madeira.

O capítulo Materiais e Métodos apresenta a metodologia usada para a avaliação da influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira. Isto é feito por meio de ensaios de caracterização do material com corpos de prova normalizados, da determinação do teor de umidade, da determinação dos valores característicos, da metodologia de análise estatística dos resultados e da determinação dos coeficientes de modificação por efeito da temperatura em todas as propriedades mecânicas estudadas.

O capítulo de Resultados e Discussões apresenta o teor de umidade, as alterações da madeira causadas pelo aquecimento, as falhas ocorridas durante os ensaios, o comportamento da massa específica e da temperatura de ensaio na resistência mecânica da madeira, a influência da temperatura na resistência mecânica da madeira e nos valores característicos normalizados, uma proposta de metodologia de ensaios para avaliação das propriedades da madeira a temperaturas elevadas, os ajustes das resistências características normalizadas, os coeficientes de modificação em função da temperatura para três espécies de madeira estudadas e a proposta dos coeficientes de modificação para a norma NBR 7190:1995.

No capítulo final são apresentadas as Conclusões deste trabalho e as Sugestões para trabalhos futuros.

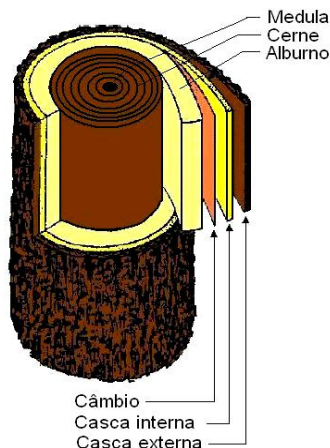
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil tem a maior área mundial de floresta plantada, cujo destino contempla grande parte da produção de celulose e carvão vegetal. A bibliografia especializada apresenta informações relevantes relativas ao uso da madeira proveniente de floresta plantada como material de construção civil no Brasil. A madeira de floresta plantada tem se revelado um material promissor para a construção civil, tanto por sua relevância no contexto ambiental, quanto por sua qualidade. São inúmeros os exemplos de aplicações da madeira de floresta plantada na produção de edificações em países industrializados, tais como Estados Unidos, Canadá e países Europeus. Esse interesse faz da madeira um material que promove desenvolvimento tecnológico no setor da construção civil e amplia suas possibilidades no uso em edificações.

### 2.1 ASPECTOS ANATÔMICOS

A madeira é um material heterogêneo natural que possui diferentes tipos de células, adaptadas a desempenhar funções específicas. Essas células dispostas no sentido radial, tangencial e longitudinal, ligadas entre si pela lignina, formam o tecido lenhoso. As variações nas composições químicas, físicas e anatômicas da madeira são grandes entre as espécies, ocorrendo variações também dentro de uma mesma espécie, principalmente em função da idade, de fatores genéticos e ambientais. Há também diferenças entre o cerne e alburno, madeira de início e fim de estação de crescimento e, em escala microscópica, entre células individuais (BROWNING, 1963). As propriedades fisicomecânicas da madeira variam dentro da mesma árvore, bem como entre árvores da mesma espécie. Segundo Mallan (1995), as variações no sentido radial são a fonte de variação mais importante, sendo determinadas pela proporção de madeira juvenil e suas propriedades fisicomecânicas ao longo do tronco.

A **Figura 2** apresenta a seção transversal do tronco. Nela podem ser observados, do centro para a periferia, a medula, o cerne, o alburno e a casca. Entre a casca e o alburno, encontra-se uma região denominada câmbio, visível somente por meio de microscópio.



**Figura 2:** Aspectos macroscópicos da madeira (IPT, 1986).

### 2.1.1 Estrutura e ultraestrutura da madeira

Para qualquer emprego industrial que se pretenda destinar a madeira, é necessário ter conhecimento da anatomia desse material. O comportamento mecânico da madeira, a secagem, a colagem de peças, a trabalhabilidade e outros fatores estão intimamente associados à sua estrutura celular.

A madeira é um produto do tecido xilemático dos vegetais superiores, localizado, em geral, no tronco e nos galhos das árvores, com células especializadas na sustentação e condução de seiva (KOLMANN; CÔTÉ, 1968). É importante ressaltar que o xilema é encontrado em várias regiões dos vegetais, não só no caule, como na raiz e nos ramos (FENGEL; WEGENER, 1989). Do ponto de vista comercial, a madeira somente é encontrada em árvores com altura superior a 6 m. O xilema é um tecido estruturalmente complexo, composto por um conjunto de células com forma e função diferenciadas, sendo o principal tecido condutor de água nas plantas vasculares. Possui ainda as propriedades de ser condutor de sais minerais, armazenar substâncias e sustentar o vegetal.

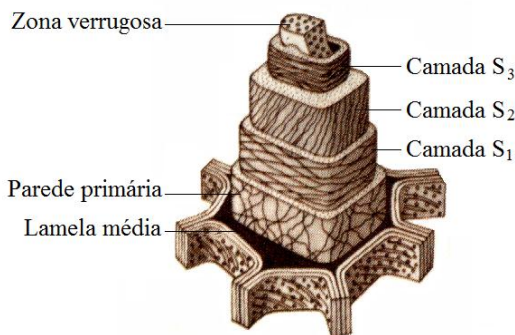
Nem todas as espécies que produzem tecido xilemático são reconhecidas comercialmente como produtoras de madeira. O xilema é um tecido característico das plantas superiores: arbustos, cipós e árvores. A presença de xilema na espécie não significa, entretanto, que a



essa espécie está apta ao uso industrial, no que se refere a desdobro de toras (KOLMANN; CÔTÉ, 1968). Para tanto, requer-se à espécie que possua volume necessário que justifique a sua exploração. Portanto, toda madeira é proveniente de tecido xilemático, mas, sob a ótica comercial, nem todo tecido xilemático produz madeira.

### 2.1.2 Camadas da parede celular

A **Figura 3** apresenta o modelo expandido da estrutura da parede celular. Sabe-se, por meio da microscopia eletrônica, que as camadas da parede celular são formadas por camadas individuais dispostas segundo um arranjo concêntrico. As camadas da parede celular são definidas a seguir:



**Figura 3:** Estrutura da parede celular (IPT, 1986).

A lamela média é uma fina camada que está localizada entre as células, servindo de elemento de ligação entre elas, formando o tecido. É composta principalmente de pectato de cálcio e magnésio. Sua espessura é de 0,2  $\mu\text{m}$  a 1,0  $\mu\text{m}$  (SARKANEN; LUDWIG, 1971). Sobre esta membrana acumulam-se, posteriormente no interior da célula, microfibrilas de celulose, formando tramas irregulares que constituem a parede primária, dotada de grande elasticidade.

A parede primária é delgada, com 0,1  $\mu\text{m}$  a 0,2  $\mu\text{m}$  de espessura, contendo celulose, hemicelulose, pectinas e proteínas imersas numa matriz de lignina. Segundo Sarkanen e Ludwig (1971), as microfibrilas de celulose formam um arranjo irregular em sua porção externa, enquanto que no interior são orientadas quase perpendicularmente ao eixo da célula.

A parede secundária é formada por três camadas:  $S_1$  e  $S_3$ , delgadas, e  $S_2$ , espessa. Na camada  $S_1$ , com 0,2  $\mu\text{m}$  a 0,3  $\mu\text{m}$  de espessura, o arranjo das microfibrilas forma um ângulo entre 50° a 70° em relação ao eixo da célula considerada. A camada intermediária  $S_2$  forma a porção principal da célula, com espessura variando de 1  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ . O ângulo microfibrilar varia entre 10° a 30° em relação ao eixo, diminuindo com o aumento do comprimento da fibra (SJÖSTRÖM, 1993).

Finalmente, a zona verrugosa é uma membrana amorfa delgada localizada na superfície interna da camada  $S_3$ , fazendo fronteira com o lúmen central oco.

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS MADEIRAS

As árvores são plantas superiores de elevada complexidade anatômica e fisiológica. Botanicamente, estão contidas na divisão das fanerógamas. Essas, por sua vez, subdividem-se em Gimnospermas e Angiospermas. As madeiras podem ser classificadas taxonomicamente em gimnospermas, também denominadas resinosas ou coníferas, e angiospermas, também denominadas folhosas. Esses tipos de vegetais apresentam grandes diferenças na estrutura celular que são apresentadas nas seções a seguir.

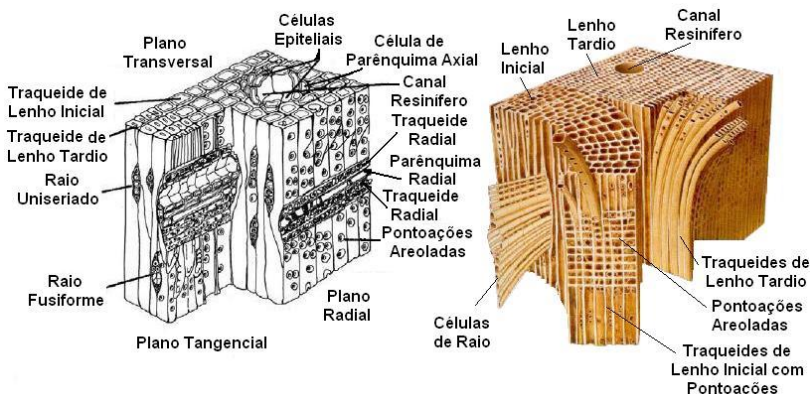
### 2.2.1 Resinosas

São árvores típicas dos climas temperados e frios, embora existam algumas espécies tropicais, de acordo com registros de Hellmeister (1983). Nas coníferas, em geral, as folhas são perenes e têm formato de escamas ou agulhas.

O gênero *Pinus*, com algumas dezenas de espécies, também pertence às coníferas. Sua introdução no Brasil vem obtendo sucesso, com destaque para o *Pinus elliottii*, o *Pinus taeda*, o *Pinus oocarpa*, algumas variedades do *Pinus caribaea* (*hondurensis*, *bahamensis*, *caribaea*, *cubanensis*), dentre outras.

Em particular no hemisfério norte, com grandes áreas de florestas, as resinosas fornecem madeira para múltiplos usos, seja na construção civil, seja na indústria dos mais diferentes segmentos. Segundo Harlow e Harrar (1958), mais de quinhentas espécies de coníferas já foram classificadas.

A organização das células das resinosas é simples. Está composta principalmente por células chamadas traqueídeos longitudinais, orientadas no sentido do eixo da árvore. Alguns dos seus principais elementos constituintes são: células na direção longitudinal e transversal, células epiteliais, canal resinífero, raio unisseriado. Esses elementos são apresentados na **Figura 4**.

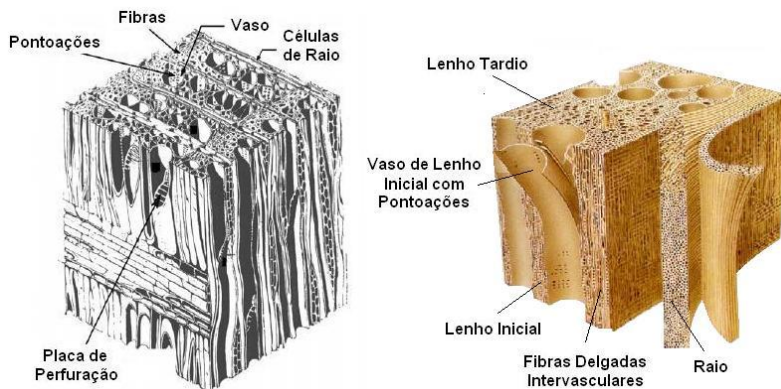


**Figura 4:** Estrutura celular de resinosas (KOLMANN; COTÊ, 1968).

### 2.2.2 Folhosas

As folhosas produzem árvores com folhas de diferentes formatos, renovadas periodicamente, e constituem a quase totalidade das espécies das florestas tropicais. Segundo IPT (2009), encontra-se, no Brasil, diversas espécies dessas árvores, que são utilizadas na produção de madeira para a indústria da construção civil, mencionando-se algumas delas: Angelim-pedra (*Hymenolobium spp.*), Cedrinho (*Erisma uncinatum*), Angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), Garapa (*Apuleia leiocarpa*), Itaúba (*Mezilaurus itaúba*), Freijó (*Cordia goeldiana*), Cambará (*Quatea spp.*). Também pertence às folhosas o gênero *Eucalyptus*, com suas centenas de espécies. Originárias da Austrália, dezenas delas estão perfeitamente aclimatadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, com predominância do *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus dunii*, *Eucalyptus microcorys*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus deglupta*.

As folhosas possuem uma estrutura mais complexa do que as das resinosas, devido, principalmente, a um maior número de tipos de células em sua estrutura anatômica. Entre os elementos constituintes encontram-se: elementos vasculares, fibras, células de raio, raio, fibras delgadas intravasculares, apresentados na **Figura 5**.



**Figura 5:** Estrutura celular de folhosas (KOLMANN; CÔTÉ, 1968).

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES *Pinus spp* e *Eucalyptus spp*

Santa Catarina alcança grande destaque pelo desenvolvimento no setor florestal e conta com grandes áreas de florestas plantadas. Dentre as espécies, destacam-se as dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. O uso atual de madeira reflorestada com os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* tem recebido especial atenção, tanto por parte de pesquisadores, quanto por parte do setor madeireiro, devido ao seu rápido crescimento e adaptabilidade, principalmente, nos estados da região Sul e Sudeste, em função do grande volume disponível em curto espaço de tempo (INO; SHIMBO, 1995).

Atualmente, a disponibilidade de matéria-prima proveniente de florestas plantadas nas quais se destacam as espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottis*, induz o mercado consumidor a preocupar-se com a qualidade da madeira e sua utilização na indústria da construção civil. No Brasil, os plantios de *Pinus spp* apresentam crescimento volumétrico entre 20 m<sup>3</sup>/ha e 30 m<sup>3</sup>/ha ao ano e sua rotação é entre 17 e 20 anos (MORESCHI, 1975). A madeira, nas idades de 8 e 14 anos, é utilizada

para produção de celulose e papel, e a madeira originada do corte final, aos 20 anos de idade, é utilizada para móveis, serraria e laminação. Entre os *Pinus spp*, destacam-se o *Pinus taeda* e o *Pinus elliottis*, que se caracterizam pelo rápido crescimento e pela alta produtividade de madeira.

Segundo Marchiori (1996), o *Pinus taeda* é oriundo das planícies adjacentes ao Golfo do México e da Costa Atlântica ao sudeste dos Estados Unidos. Em geral, cresce até a altitude de 800 m. No sul do Brasil, é cultivado, sobretudo, nas terras mais altas da Serra Gaúcha e do Planalto Catarinense. Ele possui massa específica básica entre de 400 e 450 kg/m<sup>3</sup>. Bodig e Jayne (1993) informam que a madeira de *Pinus taeda* possui massa específica aparente de 470 kg/m<sup>3</sup> a 12% de umidade.

O *Eucalyptus spp* é originário da Austrália, onde cobre cerca de 90% da área territorial daquele país, formando densas florestas, com algumas poucas espécies originárias das ilhas de Java, Filipinas, Timor, Papua e Nova Guiné, dentre outras (PRYOR, 1976). No Brasil, o plantio do *Eucalyptus spp* foi consolidado graças ao seu excelente potencial para produção de madeira e por apresentar uma série de características favoráveis, entre elas: alta adaptabilidade a diferentes condições de clima e solo; elevada produção de sementes e facilidade de propagação vegetativa; crescimento rápido, alta produtividade e boa forma de fuste; boa resposta a tratamentos culturais de manejo e melhoramento genético; adequações aos mais diferentes usos e aceitação de mercado (MORA; GARCIA, 2000; SILVA, 2005). Contudo, hoje, a produtividade dos plantios comerciais de *Eucalyptus spp* passou de 12 m<sup>3</sup>/ha ano para uma média de 39 m<sup>3</sup>/ha ano (ABRAF, 2010). Para idades entre 18 e 25 anos, o *Eucalyptus grandis* apresenta massa específica de 680 kg/m<sup>3</sup> (SILVA, 2005). Segundo Foelkel et al. (1992), a densidade básica para madeiras de *Eucalyptus spp* pode variar de 300 kg/m<sup>3</sup> a 800 kg/m<sup>3</sup>. Entretanto, para a produção de polpa celulósica é recomendado o uso de madeiras com densidade básica de 450 kg/m<sup>3</sup> a 550 kg/m<sup>3</sup>. Quando a madeira de *Eucalyptus spp* é utilizada para móveis, serraria e laminação é recomendável uma massa específica média de 650 kg/m<sup>3</sup> (DIAS, 2002).

Na **Tabela 1** são apresentadas as propriedades fisicomecânicas das espécies *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* determinadas por Szücs (2005), com 21 corpos de prova por ensaio e 12% de umidade de acordo NBR 7190:1997. Observa-se que a massa específica do *Pinus taeda* aumenta com a idade da madeira indicando a melhoria das propriedades fisicomecânicas com o aumento da idade.

**Tabela 1:** Propriedades físicas e mecânicas do *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*.

Propriedades	Espécies		
	<i>Pinus taeda</i>		<i>Eucalyptus saligna</i>
	10 anos	25 anos	
Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	368	441	731
Compressão paralela às fibras (MPa)	20	33	47
Compressão normal às fibras (MPa)	3	4	-----
Tração paralela às fibras (MPa)	39	57	96
Tração normal às fibras (MPa)	2	2	4
Cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	3	3	8
Flexão (MPa)	28	47	-----
Modulo elasticidade à flexão (MPa)	5567	9530	14933

**Fonte:** Szücs (2005).

## 2.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

Em relação à composição química elementar da madeira, pode-se afirmar que não há diferenças consideráveis, levando-se em conta as madeiras de diversas espécies. Os principais elementos existentes são o Carbono (C), o Hidrogênio (H), o Oxigênio (O) e o Nitrogênio (N), este último em pequenas quantidades.

Na composição química da madeira, ilustrada na **Tabela 2**, apresenta-se a seguinte composição percentual, em relação ao peso seco da madeira.

**Tabela 2:** Composição química da madeira.

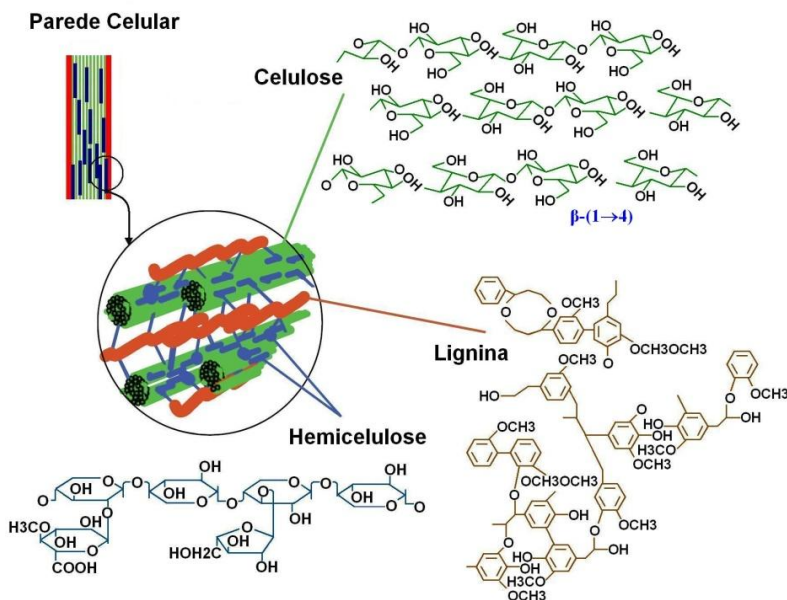
Componentes	Grupo	
	Resinosas	Folhosas
Celulose	45 % – 50%	45 % – 50%
Hemicelulose	≈ 20 %	15 % – 30%
Lignina	23 % – 35%	16 % – 25%
Outros constituintes	5 % – 10%	5 % – 10%

**Fonte:** Fengel e Wegener (1989).

Do ponto de vista químico, a madeira é um material composto por vários polímeros orgânicos. Polímeros são moléculas formadas por muitas unidades repetidas, ou monômeros. A parede celular da madeira tem como estrutura básica a molécula linear de celulose, um polissacarídeo composto por monômeros de glucose (**Figura 6**). Estes

polímeros de celulose compõem entre 45 % a 50% do peso seco da maioria das madeiras. Além da celulose, está presente na madeira a hemicelulose, formada por muitas combinações de pentoses de açúcar (xilose e arabinose), conforme ilustrado na **Figura 6** (FENGEL; WEGENER, 1989). A hemicelulose difere em alguns aspectos da celulose, principalmente em conformação, grau de polimerização e peso molecular, mas são de alguma forma, similares.

O terceiro maior constituinte da madeira é a lignina, molécula polifenólica tridimensional, pertencente ao grupo dos fenilpropanos, de estrutura complexa e alto peso molecular (FENGEL; WEGENER, 1989), o que confere à madeira a resistência característica a esforços mecânicos.



**Figura 6:** Principais polímeros na parede celular (MILLER, 1999).

Muitas outras substâncias químicas estão ainda presentes nas madeiras, como os extrativos, resinas, taninos, óleos, gomas, compostos aromáticos e sais de ácidos orgânicos (FENGEL; WEGENER, 1989).

## 2.4.1 Celulose

A celulose compõe a maior parte dos tecidos vegetais, perfazendo, aproximadamente, a metade dos componentes da madeira, tanto nas resinosas, quanto nas folhosas. Trata-se de um polissacarídeo composto exclusivamente por unidades de  $\beta$ -D-glucose, que estão covalentemente ligadas através de funções acetais entre os grupos OH equatorial do átomo de carbono-4 ( $C_4$ ) e o átomo de carbono-1 ( $C_1$ ), daí a denominação  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) (MILLER, 1999). Sua estrutura tende à linearidade graças à orientação que é assumida pelas hidroxilas anoméricas (**Figura 6**).

A celulose consiste de uma mistura de  $\beta$ -D-glucanas, cujas cadeias apresentam diferentes comprimentos. Portanto, quando se fala de grau de polimerização ou massa molar para certa amostra, refere-se, na verdade, a um valor médio. Valores médios encontrados para o grau de polimerização da celulose estão na faixa de 1000 a 15000 unidades de anidroglicose (SJÖSTRÖM, 1993).

Segundo Atalla (1993), a estrutura de celulose pode ser definida em três níveis organizacionais. O primeiro nível corresponde à estrutura primária da celulose, que é definida pelas ligações  $\beta$ -(1-4)-glicosídicas entre unidades de anidroglicose. O segundo nível é caracterizado pelas ligações de hidrogênio intramoleculares que conferem linearidade ao homopolímero, envolvendo, principalmente, o oxigênio hemiacetalico e a hidroxila ligada ao carbono C-3 da unidade D-glucopiranosídica vicinal. Finalmente, o terceiro nível define o grau de associação molecular entre várias cadeias lineares da celulose, envolvendo, desta feita, ligações de hidrogênio intermoleculares, de natureza intraplanar ou interplanar, mantidas pela interação polar entre o oxigênio hemiacetalico e as hidroxilas ligadas aos carbonos C-3 e C-6 de unidades adjacentes (FENGEL; WEGENER, 1989).

Regiões de maior organização da celulose são denominadas regiões cristalinas e a extensão delas depende de fatores como o grau de polimerização e a orientação espacial assumida pelas cadeias que compõem o agregado. No entanto, a manutenção dessa organização supramolecular é finita e, a partir de certo limite, as cadeias de celulose passam a assumir uma disposição aleatória, que ocorre tanto na superfície de estruturas cristalinas quanto nas regiões que as interligam. Fatores externos como a exposição a altas temperaturas pode causar a perda irreversível da cristalinidade da celulose, em um processo denominado de amorfogênese (FENGEL; WEGENER, 1989). Esse



fenômeno é observado em todos os processos que envolvem ações mecânicas, térmicas ou químicas sobre fibras celulósicas de ocorrência natural.

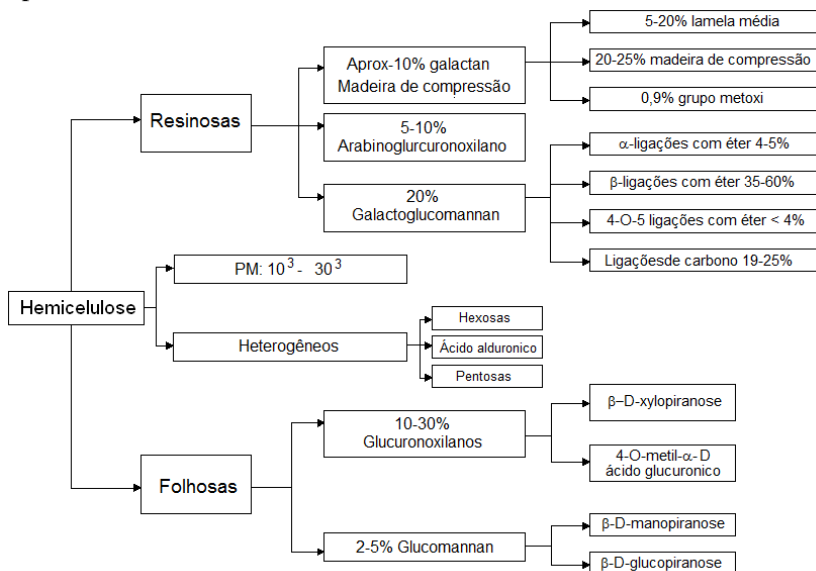
O menor elemento cristalino da fibra celulósica é considerado a fibrila elementar, que é formada por um agregado de cerca de quarenta cadeias de celulose dispostas lateralmente (FENGEL; WEGENER, 1989). A associação de várias fibrilas elementares forma os chamados cristais, em que regiões altamente ordenadas (cristalinas) alternam-se com regiões menos ordenadas (amorfas). Os cristalitos, por sua vez, formam as microfibrilas de celulose através da interveniência de hemicelulose e protolignina. Dada essa estrutura macromolecular complexa e fortemente associada, materiais celulósicos geralmente possuem alta resistência à tração e são insolúveis na maioria dos solventes orgânicos (NEVELL; ZERONIAN, 1995; FENGEL; WEGENER, 1989).

Os grupos hidroxilas (-OH) são responsáveis pelo comportamento físico e químico da celulose, sendo capazes de formar dois tipos de pontes de hidrogênio, em função do seu posicionamento na unidade glicosídica. Existem pontes de hidrogênio entre grupos -OH de unidades glicosídicas adjacentes da mesma molécula de celulose, que são ligações intramoleculares, responsáveis por certa rigidez das cadeias unitárias. Também ocorrem ligações entre grupos -OH de moléculas adjacentes de celulose, constituindo as chamadas ligações intermoleculares, responsáveis pela formação das estruturas supramoleculares (SJÖSTRÖM, 1993).

#### 2.4.2 Hemicelulose

A hemicelulose é um polissacarídeo que contém pelo menos dois tipos de monossacarídeos em sua estrutura primária, e que podem corresponder a diferentes tipos de hexoses (glucose, manose e galactose), pentoses (xilose e arabinose) e, em alguns casos, ácidos urônicos. Esses polissacarídeos estão associados com a celulose na parede celular e são constituídos por cadeias poliméricas menores que as da celulose, embora exerçam função estrutural análoga. Como no caso da celulose e da lignina, o teor e as proporções dos diferentes componentes encontrados nas hemiceluloses variam grandemente conforme a espécie e, provavelmente, de árvore para árvore e de tecido para tecido num mesmo espécime. Por outro lado, as folhosas

normalmente apresentam uma proporção de hemicelulose superior à observada em madeiras resinosas (FENGEL; WEGENER, 1989). A **Figura 7** apresenta os principais componentes da hemicelulose em espécies resinosas e folhosas.

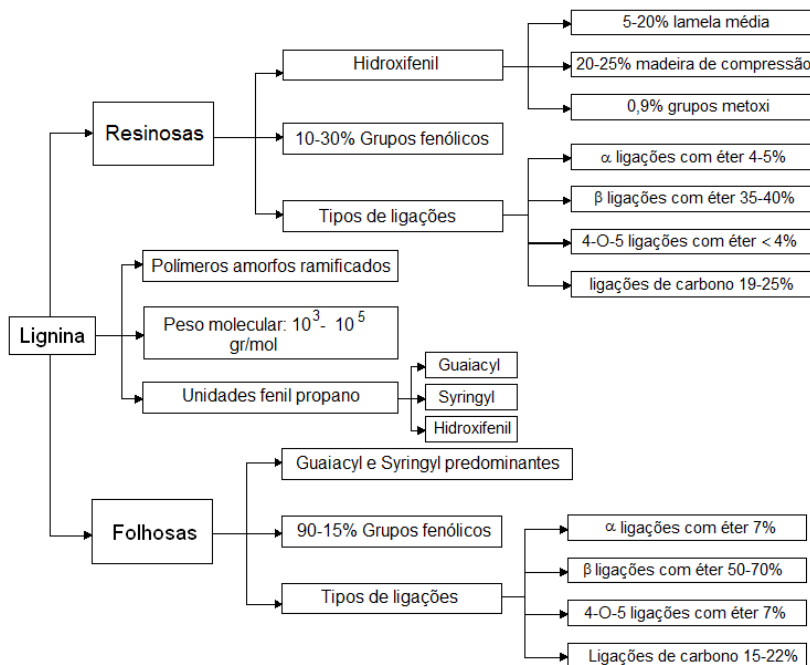


**Figura 7:** Principais componentes químicos da hemicelulose (SJÖSTRÖM, 1993).

### 2.4.3 Lignina

Segundo Fengel e Wegener (1989), a lignina é a substância orgânica natural mais abundante na madeira e a maior fonte de compostos aromáticos. Sua composição química, baseada em unidades fenilpropanicas, e sua estrutura macromolecular diferem significativamente da apresentada pelos outros dois componentes macromoleculares: celulose e hemicelulose. Segundo Fengel e Wegener (1989), a lignina é um composto amorfo e ramificado, existente nos vegetais lenhosos, cuja função é dar rigidez à parede celular, agindo como um agente de endurecimento e uma barreira à degradação enzimática da parede celular. A lignina é um polímero natural, cuja estrutura principal provém da polimerização de-hidrogenativa (iniciada por enzimas) dos seguintes precursores primários: álcool coníferílico,

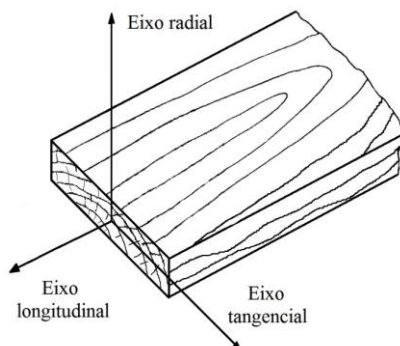
álcool sinapílico e álcool p-cumarílico (FENGEL; WEGENER 1989; SJÖSTRÖM 1993). De acordo com Fengel e Wegener (1989), essa polimerização é iniciada por transferência de elétrons, que resulta na formação de radicais fenóxidos, estabilizados por ressonância. Esses radicais se unem de diferentes maneiras, resultando uma molécula muito complexa. Nessas moléculas, mais de dois terços das unidades de fenilpropano estão unidos por ligações do tipo éter (C-O-C), e o restante por ligações C-C. A **Figura 8** apresenta a composição química geral da lignina em espécies resinosas e folhosas (FENGEL; WEGENER 1989; SJÖSTRÖM 1993).



**Figura 8:** Principais componentes químicos da lignina (SJÖSTRÖM, 1993).

## 2.5 PROPRIEDADES DA MADEIRA

Devido à sua estrutura interna, a madeira é um material ortotrópico, o que significa que as suas propriedades (físicas e mecânicas) diferem nas três direções principais mutuamente perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial (**Figura 9**).



**Figura 9:** Eixos ortotrópicos em referencia ao plano da madeira (adaptado de STALNAKER; HARRIS, 1997).

As variações das propriedades da madeira ocorrem dentro de cada espécie, bem como dentro de troncos individuais (MALAN, 1995). Essas variações afetam diretamente as propriedades físicas e mecânicas. O conhecimento das propriedades físicas da madeira é importante já que expressam suas qualidades para fins tecnológicos e industriais determinando o uso mais adequado para cada espécie.

A umidade, massa específica, tipos de água presente na madeira, contração e inchamento, são os principais fatores que afetam principalmente as propriedades físicas da madeira. Essas propriedades serão abordadas a seguir (BODIG; JAYNE, 1993).

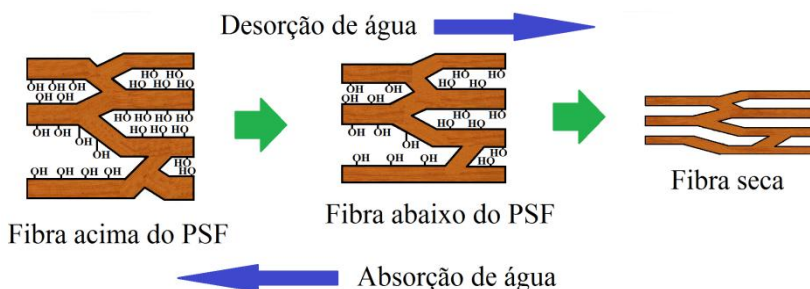
### 2.5.1 Teor de umidade

Embora o teor de umidade não possa ser considerado como uma característica intrínseca da madeira, o seu estudo é indispensável por se tratar de um parâmetro que afeta o comportamento deste material quanto à trabalhabilidade, à estabilidade dimensional, à resistência mecânica e à durabilidade natural. A madeira é um material, de estrutura complexa, heterogênea, e altamente higroscópica, retraindo-se e inchando-se de acordo com a umidade do ambiente. Essa variação no teor de umidade afeta a geometria das peças em serviço e as características de resistência mecânica dos elementos estruturais.

A determinação do teor de umidade e de sua variação no tronco das árvores ou das peças de madeira é de extrema importância no seu desempenho e utilização. Os elevados gradientes de umidade da madeira constituem-se em uma das causas de defeitos de secagem, notadamente

os caracterizados por empenamentos e fendilhamentos. O teor de umidade da madeira na árvore pode variar de 31% a 249% no cerne e de 40% a 213% no alborno (SIMPSON; TENWOLDE, 1999).

Segundo Lundberg e De Ruvo (1978), quando a celulose começa a perder água durante o tratamento térmico, muitas ligações de hidrogênio entre a celulose e a água são convertidas em ligações de celulose-celulose, que aumentam a resistência e rigidez das fibras. Além disso, Newman e Hemmingson (1997) afirmam que, quando as regiões cristalinas adjacentes de celulose apresentam um baixo teor de umidade, estas regiões podem se juntar e transformar-se numa única região (**Figura 10**).



**Figura 10:** Perda de água nas fibras da madeira.

#### 2.5.1.1 Tipos de água existente na madeira

Existem dois tipos de água na madeira: a água livre ou capilar, localizada nos lúmens celulares e espaços intercelulares, retida por forças capilares, e a água de impregnação ou higroscópica, que se encontra nos espaços submicroscópicos da parede celular e ligada por forças físico-químicas. Na secagem da madeira, a primeira água a ser removida é a água livre, contida nas cavidades celulares (lúmens das células). As forças que mantêm ligada a água livre são apreciavelmente menores do que as forças que mantêm a água de impregnação existente na parede celular (SKAAR, 1972). A retirada da água capilar ocasiona apenas uma perda de peso na madeira. Isto ocorre quando a madeira se encontra com teores de umidade superiores ao ponto de saturação das fibras (PSF) (KOLLMANN, 1959), ponto em que os lúmens celulares estão vazios e apenas as paredes celulares possuem água. Segundo Skaar (1972), o ponto de saturação das fibras varia, normalmente, entre 25% e 35% de umidade em relação ao peso seco do material. O ponto de

saturação das fibras é de grande importância prática, uma vez que as variações dimensionais da madeira manifestam-se apenas abaixo deste ponto. Por esta razão, variações no teor de umidade abaixo do PSF têm grande importância na utilização da madeira. A água de impregnação dentro do intervalo de 6% a 28% é adsorvida em camadas polimoleculares ligadas por forças eletrostáticas (KOLLMANN, 1959). Abaixo deste teor de umidade (0% – 6%), encontra-se a água de adsorção físico-química, aderida às interfaces entre as moléculas de celulose e hemicelulose por forças de valências secundárias (Van der Waals e pontes de hidrogênio) (BODIG; JAYNE, 1993).

### 2.5.2 Massa específica

Muitos estudos têm demonstrado o efeito da massa específica nas propriedades mecânicas da madeira (KOLLMANN, 1959; SKAAR, 1972; BARRICHELO; BRITO, 1976; BURGER; RICHTER, 1991; BODIG; JAYNE, 1993; BOWYER et al., 2003). Todas as pesquisas determinam o valor da massa específica à temperatura ambiente. Contudo, existem muitos trabalhos sobre a perda de massa da madeira devido à temperatura (BEALL, 1970; BABRAUSKAS, 2004; BARTKOWIAK, 2004; BOONSTRA et al., 2006; JUNKKONEN et al., 2006).

A massa específica é uma das mais importantes propriedades da madeira, pois está relacionada diretamente ao volume vazio dos poros e, consequentemente, a outras propriedades físicas e mecânicas. De uma maneira geral, quanto maior a massa específica, maior a resistência mecânica e ela varia, tanto entre diferentes espécies, quanto dentro de uma mesma espécie. Devido a esta variação, a resistência mecânica de uma árvore jovem é bem inferior a de uma árvore adulta.

Na caracterização da madeira, a determinação de sua massa específica e, principalmente, de sua variação dentro da árvore, tanto na direção radial, da medula para a casca, quanto no sentido base-topo, é fundamental como subsídio ao entendimento de sua qualidade. As peças de madeira com menor variação de massa específica são adequadas para utilizações que exigem material homogêneo e com menor variabilidade nas propriedades físico-mecânicas. Diferentes níveis de variação da densidade da madeira ocorrem da mesma forma, no tronco, em espécies de folhosas e coníferas (BODIG; JAYNE, 1993).

### 2.5.3 Contração e inchamento da madeira

A contração e o inchamento correspondem às alterações na quantidade de água de impregnação na madeira. A contração ocorre abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) e o inchamento ocorre acima do ponto de saturação das fibras (PSF). Durante o processo de secagem da madeira, a maior alteração dimensional da madeira se manifesta no sentido tangencial aos anéis de crescimento, seguida pela dimensão radial, sendo praticamente desprezível no sentido longitudinal (PANSIN; DE ZEEUW, 1980). Segundo Durlo e Marchiori (1992), a contração e o inchamento constituem, conjuntamente com a anisotropia, características indesejáveis da madeira, limitando o seu uso para diversas finalidades ou, ainda, exigindo técnicas específicas de utilização.

Segundo Oliveira (1998), o conhecimento das propriedades higroscópicas é a chave para a utilização bem-sucedida da madeira. Sabe-se que a madeira que secar, a um teor de umidade igual ou próximo àquele de equilíbrio com as suas condições de uso, poderá ter seus problemas referentes à umidade minimizados ou definitivamente eliminados.

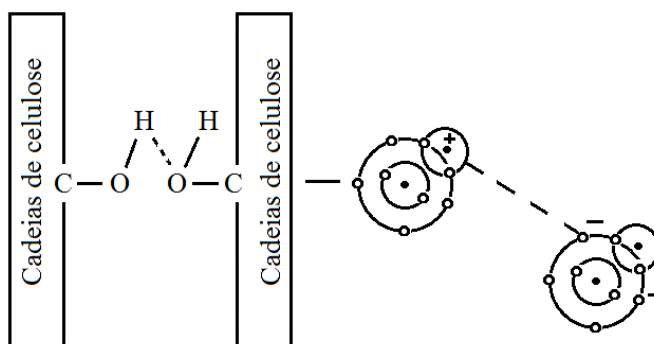
Segundo Kollman e Côté (1968), a diferença entre a retratibilidade tangencial e a radial pode ser explicada pela influência restritiva dos raios na direção radial e também pelo arranjo helicoidal diferente das microfibrilas nas paredes tangenciais e radiais. Uma das causas das propriedades anisotrópicas da madeira é a orientação das micelas, fibrilas e fibras que formam o tecido lenhoso.

Masseran e Mariaux (1985) relatam que, em grande parte das folhosas, as maiores diferenças da retratibilidade tangencial em relação à radial são atribuídas às características anatômicas. Segundo os autores, o volume dos raios, a dimensão radial das fibras e as diferenciações químicas entre as paredes radiais e tangenciais são responsáveis pela anisotropia da madeira. Tsoumis (1991) afirma que a magnitude da contração e da expansão da madeira torna-se maior com o aumento da densidade.

#### 2.5.3.1 Comportamento mecânico dos polímeros da madeira

O comportamento mecânico da madeira pode ser explicado pelo comportamento de seus polímeros. O principal polímero da madeira é a celulose. Embora as características elásticas da região cristalina da

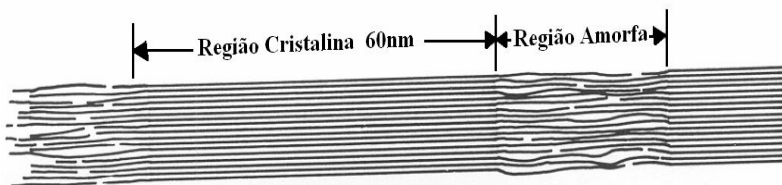
celulose tenham sido muito estudadas, o comportamento das regiões amorfas dela mesma pode ter um efeito mais significativo sobre a sua resistência mecânica (MADSEN, 2004). Em geral, acredita-se que as moléculas de celulose são mantidas sob controle combinado por meio da ligação de ponte de hidrogênio das regiões amorfas e cristalinas. Na região cristalina, a ligação do hidrogênio é completamente regular. Na região amorfa, a ligação é altamente irregular e muito mais variável (BOONSTRA et al., 2007). Bodig e Jayne (1993), Gindl et al. (2004) e Somboon et al. (2008) afirmam que as ligações de hidrogênio entre as cadeias de celulose são os resultados do intercâmbio de elétrons entre o grupo de hidroxila de uma cadeia e o oxigênio de outra, conforme ilustrado na **Figura 11**.



**Figura 11:** Ligações de hidrogênio nas cadeias de celulose e atrações eletrostáticas (BODIG; JAYNE, 1993).

A **Figura 12** apresenta uma microscopia de raio X, onde se pode observar as regiões amorfas e cristalinas encontradas nas moléculas de celulose. As regiões cristalinas são resultantes da ação combinada da biopolimerização e cristalização da celulose, causadas por processos enzimáticos. As regiões amorfas resultam da má formação da estrutura devido à alteração no processo de cristalização. As regiões amorfas são citadas, por alguns autores, como regiões em que a cristalização ocorreu com defeito (KLASON, 1976; BOID; JAYNE, 1993; MADSEN, 2004). A proporção entre as regiões cristalinas e amorfas, que determina o grau de cristalinidade e as características dimensionais dos domínios cristalinos, é variável (MADSEN, 2004).





**Figura 12:** Regiões amorfas e cristalinas da celulose (BODIG; JAYNE, 1993).

Segundo Chand e Hashmi (1993) e Greenberg et al. (1989), a variação da resistência à tração e do módulo de elasticidade da madeira estão relacionados diretamente com a variação do grau de cristalinidade dela mesma, ou seja, quando as fibras apresentam maiores regiões cristalinas, a resistência mecânica aumenta, pois a celulose é o único componente presente na fibra que se cristaliza.

Segundo Winandy e Rowell (2005), a celulose é o polímero que mais contribui para a resistência mecânica da madeira. As cadeias de celulose são extremamente resistentes a esforços de tração e de compressão, devido às pontes de hidrogênio dentro dela. Segundo Fengel e Wegener (1989) e Sjöström (1993), as ligações de pontes de hidrogênio entre grupos OH de unidades glicosídicas adjacentes da mesma molécula de celulose são ligações intramoleculares, responsáveis por certa rigidez das cadeias unitárias.

Por outro lado, Tang et al. (1971) *apud* Bodig e Jayne (1993) relatam que um fator importante a considerar é a relação entre o grau de polimerização da celulose e a resistência à tração das fibras. Quanto maior o grau de polimerização da celulose, maior é a resistência à tração das fibras.

Rowell et al. (1997) demonstraram que a composição química de fibras lignocelulósicas influencia as suas propriedades mecânicas e a sua estrutura física, sendo que o conteúdo de lignina e de hemicelulose presentes nas fibras tem efeito sobre a resistência à tração.

Segundo Bisanda e Ansell (1991), a resistência e a rigidez das fibras dependem do conteúdo de celulose e do ângulo espiral que as microfibrilas da parede celular secundária ( $S_2$ ) fazem com o eixo da fibra.

Acredita-se que a lignina contribui positivamente para todas as propriedades físico-mecânicas da madeira, em particular para a resistência à compressão e ao cisalhamento na parede celular por

dominar a instabilidade lateral das microfibrilas e a resistência ao corte (BODIG; JAYNE, 1993).

A influência da hemicelulose nas propriedades mecânicas da madeira não tem sido muito estudada (WINANDY; ROWELL, 2005). Este polímero tem a propriedade de absorver e liberar umidade com maior facilidade que os outros componentes da parede celular, sendo o principal responsável pela estabilidade dimensional da madeira. A quantidade e o peso molecular deste carboidrato na madeira são substancialmente menores que os outros componentes, assim, o comportamento mecânico em relação à celulose e à lignina é mais baixo (BOONSTRA et al., 2007).

Junto com os componentes da parede celular, existem numerosas substâncias que são chamadas extrativos. Os extrativos presentes na madeira são compostos orgânicos com características comuns, principalmente aqueles que podem ser extraídos com água ou com outros solventes orgânicos. Entre os extrativos, encontram-se terpenos, fenóis, taninos, ácidos graxos, flobafenos, ceras e resinas. A influência dos extrativos nas propriedades mecânicas já foi estudada. Eles apresentam um efeito favorável sobre a resistência à compressão paralela às fibras e um menor efeito sobre o módulo de ruptura e pouca influência sobre a resistência ao choque (WANGAARD, 1957, *apud* BODIG; JAYNE, 1993). Em geral, pode-se concluir que o efeito dos extrativos sobre as propriedades mecânicas é inferior ao seu efeito sobre a massa específica. É fato conhecido que os extrativos apresentam uma influência significativa sobre a durabilidade natural da madeira.

## 2.6 DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA

A combustão da madeira ocorre pela difusão de vapores internos, convecção interna, propriedades da madeira parcialmente carbonizada, convecção externa, cinética da pirólise, taxa de carbonização externa, tempo de aquecimento e fluxo de calor e gases (BROWNE, 1958; KOLLMANN, 1968; WHITE, 1990; BABRAUSKAS, 2001).

É fato conhecido que a madeira e seus derivados, sob a ação do calor, sofrem variações físicas e químicas em sua estrutura. Em temperaturas elevadas, a madeira sofre um processo de degradação em que todos seus componentes são profundamente modificados (BROWNE, 1958). Ocorrem fenômenos físicos como perda de umidade, liberação de gases voláteis inflamáveis, combustão do material lenhoso e combustão incandescente do carbono fixo (WINANDY; ROWELL,

2005). A temperatura exata para a decomposição térmica da madeira dependerá significativamente da espécie vegetal e da sua composição química (PONCSÁK et al., 2006; BODÎRLĂU et al., 2007) e do tipo de corte da madeira (BODÎRLĂU et al., 2007).

Vários trabalhos foram encontrados sobre a degradação térmica da madeira, a maioria deles apresenta a degradação ocorrendo em cinco fases e cada uma delas em sua respectiva faixa de temperatura, conforme ilustrado na **Tabela 3** (BROWNE, 1958; WHITE, 1990; BABRAUSKAS, 2001; SARDINHA, et al., 2002; WHITE; TRAN, 2003; BABRAUSKAS, 2004; PINTO, 2005; WHITE, 2006).

**Tabela 3:** Fases de degradação da madeira.

Fases	Temperatura (°C)	Fenômeno que ocorre na madeira
I	Até 200	Processo denominado pirólise lenta. Libera vapor de água e gases. Reações endotérmicas. Mudança de cor.
II	200 a 280	Eliminação de gases. Ocorrem reações exotérmicas primárias sem inflamação. Temperatura considerada como a temperatura de ignição. Fase conhecida como pirólise rápida.
III	280 a 380	Produzem-se grandes quantidades de destilados, principalmente ácidos acéticos e metanol. O resíduo final dessa fase já é carvão vegetal, que ainda apresenta compostos volatilizáveis em sua estrutura. Fase exotérmica.
IV	380 a 500	Redução da emissão de gases. Produção de alcatrão e diversas substâncias gasosas condensáveis. A perda de massa é da ordem de 70% em relação à massa original. Fase exotérmica.
V	Acima de 500	Término da carbonização e início da gasificação do carvão. O carvão é o resíduo principal. Fase exotérmica.

A resistência mecânica e a rigidez são diretamente afetadas ao se expor a madeira a elevadas temperaturas, devido, principalmente, à transição vítrea e à degradação térmica dos polímeros da mesma. Essas

alterações coincidem perfeitamente com a diminuição da resistência mecânica decorrente do aumento da temperatura especialmente acima de 200 °C (SCHAFFER, 1973; PONCSÁK et al., 2006). A decomposição térmica da madeira depende fundamentalmente de dois fatores: do nível de temperatura e da duração da exposição ao calor (THOMSON; STEVEN, 1976). Propriedades mecânicas da madeira como a resistência ao choque, o módulo de elasticidade na flexão o módulo de ruptura e a resistência à compressão diminuem, consideravelmente, devido ao aquecimento. Ensaio mecânicos realizados com madeiras tratadas termicamente mostraram uma perda de 20% a 50% no módulo de ruptura à flexão (GIEBELER, 1983; TEISCHINGER, 1992; GERHARDS, 1979; MORAES, 2004). Nas temperaturas acima de 200 °C, ocorre perda de massa (BODİRLÄU et al., 2007). Na madeira, a maior perda de massa da celulose ocorre entre 300 °C e 400 °C, da hemicelulose entre 250 °C e 350 °C e da lignina entre 250 °C e 450 °C (ALÉ et al., 2002).

Muitos compostos orgânicos voláteis são produzidos e liberados quando a madeira é aquecida, tais como, alcoóis, resinas e terpenos. São eles que participam na reação em cadeia durante o processo de combustão da madeira (MANNINEN et al., 2002). No início do período de aquecimento, quando as temperaturas se encontram abaixo de 100 °C, existe uma notável perda de carboidratos devido às reações de despolimerização que ocorrem (GERHARD, 1979, 1982, 1983; KOCH, 1985). Acima de 100 °C, a camada superficial da madeira se desidrata, ocorre perda de peso devido à degradação dos carboidratos e da lignina. Elimina-se a maior parte dos componentes voláteis e as ligações químicas de seus componentes começam a se romper. A taxa de ruptura das ligações aumenta com o aumento da temperatura. Entre 100 °C e 200 °C, há liberação de água, óxidos de carbono e vestígios de produtos biológicos devido ao aquecimento, sendo considerado o início da degradação térmica (SHAFIZADEH, 1985; LEVAN, 1989). Segundo Dirol (1993), o aquecimento da madeira a 250 °C por 10 min a 20 min leva a uma significativa degradação dos carboidratos e lignina.

Kosik et al. (1968) realizaram ensaios de análise térmica diferencial (DTA) com a espécie *Fagus sylvatica* e observaram que, durante a degradação de seus componentes químicos, ocorrem reações exotérmicas entre 200 °C e 250 °C e entre 280 °C e 320 °C.

O aquecimento da madeira também pode afetar a sua superfície dificultando processos pintura de colagem. Para espécies resinosas, ocorre uma concentração de resina em sua superfície, que inibe fisicamente a molhagem e pode evitar o espalhamento de adesivos

durante em processo de laminação de madeira (VIITANIEMI; JASMA, 1994).

Observou-se que, ao tratar termicamente a madeira com vapor e água quente, as espécies folhosas foram mais fáceis de tratar que as resinosas em todos os níveis de temperatura, enquanto que as resinosas foram mais fáceis de tratar que as folhosas, quando foram aquecidas em atmosfera seca (forno). Isso foi comprovado quando foram realizados ensaios físicos e mecânicos da madeira (GREEN; EVANS, 2001).

## 2.6.1 Alterações das características da madeira devido à temperatura

A temperatura afeta a cor da madeira e também as propriedades da parede celular das células que a compõe. Esse assunto será tratado em detalhe a seguir.

### 2.6.1.1 Alteração na cor da madeira

As mudanças de cor na madeira durante tratamentos térmicos já foram estudadas por muitos autores (SANDERMANN; SCHLAMBOM, 1962; BRAUNER; LOOS, 1968; Mc MILLEN, 1976; SCHMIDT, 1986; VIITANIEMI; JASMA, 2001; MANNINEN et al., 2002; BRITO et al., 2002; BEKHTA; NIEMZ, 2003; LUOSTARINEN, 2006; BRITO, et al., 2006). Para alguns pesquisadores, essas mudanças de cor produzem melhoras nas propriedades estéticas. Para outros, as alterações de cor estão associadas a uma degradação térmica dos componentes químicos da madeira e a uma redução nas propriedades mecânicas da mesma (DIESTE, 2002; LUOSTARINEN, 2006) e podem ocorrer na superfície ou em todo o material, conforme o tempo de exposição ao calor ou à intensidade deste.

Segundo Sandermann e Schlambom (1962), essas mudanças dependem da espécie de madeira e de sua composição química, especialmente do tipo e da quantidade de extrativos. Segundo Manninen et al. (2002), as mudanças de cor na madeira começam a ocorrer a temperaturas abaixo de 40 °C e são atribuídas a mudanças físicas, principalmente, às saídas dos extrativos presentes na madeira tais como taninos e terpenos. Algumas mudanças químicas durante o tratamento térmico podem ocorrer entre 40 °C e 90 °C.

Segundo Brauner e Loos (1968), McMillen (1976) e Schmidt (1986), resinosas tratadas termicamente tornam-se consideravelmente

mais escuras do que as folhosas. Segundo eles, o nível de umidade e a temperatura durante o tratamento são fatores que influenciam a mudança de cor. Viitaniemi e Jasma (2001) observaram que, durante o tratamento térmico, existem modificações na cor da madeira. Essas ocorrem pela esterificação de resinas e ceras que migram para a superfície. Já Fengel (1966), Charrier et al. (1995) e Burtin et al. (1998) observaram que estas mudanças são devidas aos compostos que exalam da hidrólise dos carboidratos e das reações com outros componentes da madeira.

Quando o *Pinus radiata* é submetido a temperaturas entre 80 °C e 100 °C por curto período, a descoloração ocorre de forma superficial, devida à emissão considerável de monoterpenos e de quantidades menores de formaldeídos, furfural, ácido acético, metanol (MILLET, 1952; THEANDER et al., 1993; Mc DONALD et al., 1999; McDONALD et al., 2000). Este fenômeno é conhecido como “mancha castanha” e ocorre principalmente com o *Pinus radiata* (KREBER; HASLETT, 1998). Entre 100 °C e 150 °C, a mudança de cor ocorre em toda sua estrutura (SCHNEIDER, 1971; SCHNEIDER, 1973).

#### 2.6.1.2 Alterações das propriedades da parede celular

O aquecimento da madeira pode afetar a sua estrutura anatômica, mas os efeitos dependem da espécie de madeira e das condições do processo de aquecimento utilizado. Acredita-se que as fendas e rachaduras na parede celular são devidas a tensões internas da estrutura, entre as camadas  $S_1$  e  $S_2$ , quando a madeira é submetida a altas temperaturas (BOONSTRA et al., 2006). O mesmo autor observou que as madeiras de baixa massa específica são mais sensíveis a fendas no lenho tardio, especialmente aquelas com anéis anuais estreitos. É fato que existe grande diferença entre a estrutura anatômica do lenho inicial e o lenho tardio. Foi observado nas espécies resinosas que quando aquecidas a temperaturas elevadas, as células de parênquimas nos raios e células epiteliais em torno dos canais resiníferos do albarno são danificadas (BOONSTRA et al., 2006).

Fengel e Weneger (1989) analisaram, por microscopia eletrônica, amostras de abeto após os aquecimentos das delas a 150 °C. Foi observada a existência de algumas fendas nas camadas  $S_1$  e  $S_2$  e nos cantos das células. O mesmo comportamento foi observado nas espécies bétula e faia, quando foram submetidas a tratamento hidrotérmico entre 120 °C e 160 °C (FENGEL; WENEGER; 1989; GROMOV et al., 1972). Fengel (1966) e Hietala et al. (2002) *apud* Esteves e Pereira (2009)

encontraram fissuras na lamela média (camada  $S_1$ ), em amostras de abeto a temperaturas entre 180 °C e 200 °C. Também foram observadas fendas na parede celular, alterações nas pontuações e substâncias dissolvidas e depositadas no tórus das pontuações.

Gosselink et al. (2004), *apud* Esteves e Pereira (2009), relataram que, ao submeter o pinho escocês a um tratamento térmico por 15 minutos, a uma temperatura de 275 °C, o tamanho dos poros aumentou significativamente devido talvez à remoção de extraíveis e ceras da parede celular, não se encontrando grandes diferenças entre às dimensões das células.

### 2.6.2 Conclusões parciais

A madeira e seus derivados, sob a ação do calor, sofrem um processo de degradação térmica em que todos seus componentes são profundamente modificados. Fatores como perda de umidade, fendas nas camadas da parede celular e lamela média, liberação de gases e combustão do material lenhoso, afetam diretamente as propriedades físicas, mecânicas e químicas.

Em geral, quando a madeira é exposta ao calor, apresenta degradação térmica da celulose, da hemicelulose e da lignina. Durante o aquecimento da madeira, muitos compostos orgânicos voláteis, tais como álcoois, resinas e terpenos são produzidos e liberados. São eles que participam da reação em cadeia durante o processo de combustão da madeira.

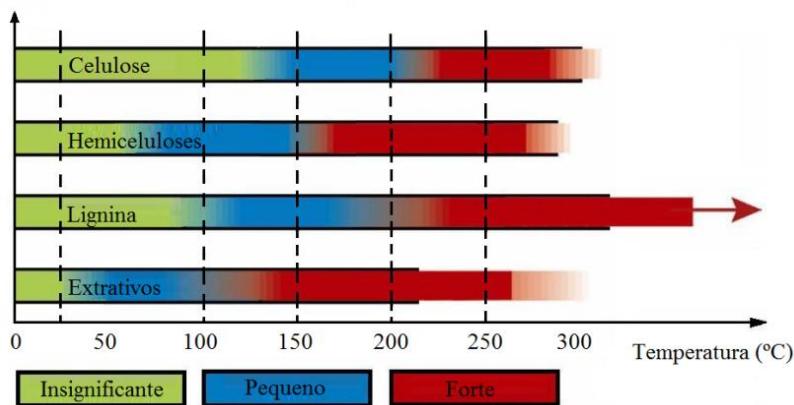
## 2.7 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE OS POLÍMEROS DA MADEIRA

A madeira, quando é submetida a altas temperaturas, sofre uma decomposição térmica dos seus componentes: celulose, hemiceluloses e lignina, passando por um processo de carbonização em atmosfera inerte. Vários trabalhos foram publicados sobre a influência da temperatura sobre os polímeros da madeira (GORING, 1963; SCHAFFER, 1973; SALMEN, 1982; BACK; SALMEN, 1982; IRVINE, 1984; WEGENER, 1989; OLSSON; SALMEN, 1997; FENGEL; PONCSÁK et al., 2006). Schaffer (1973) menciona que a partir de 50 °C já ocorrem mudanças físicas e químicas dos constituintes principais da madeira. As reações

exotérmicas iniciam-se entre 150 °C e 160 °C e aumentam com o aumento da temperatura, liberando maior quantidade energia a temperaturas maiores que 200 °C, o que origina uma perda de massa acelerada.

Ao se expor a madeira a altas temperaturas, as ligações químicas em sua estrutura começam a se romper acima de 100 °C. Entre 100 °C e 200 °C há liberação de água, óxidos de carbono e vestígios de produtos biológicos (SHAFIZADEH, 1985; LEVAN, 1989, *apud* ALÉ et al., 2002). Os polímeros da madeira volatilizam-se intensamente em distintas faixas de temperatura: as hemiceluloses entre 200 °C e 300 °C; a celulose entre 240 °C e 350 °C e a lignina entre 350 °C e 500 °C (BRADBURY et al., 1979; SALAZAR; CONNOR, 1983; CONESA et al., 1995; RESENDE, 1995).

A **Figura 13** ilustra a intensidade das alterações dos componentes químicos da madeira de acordo com o nível de temperatura alcançado durante o aquecimento. Percebe-se que as alterações nos polímeros da madeira iniciam-se a 100 °C, começando pelos extrativos e seguido pela hemicelulose, lignina e finalmente a celulose.



**Figura 13:** Alterações dos componentes com a temperatura (SUNDQVIST, 2004).

### 2.7.1 Degradação térmica da celulose

A degradação térmica da celulose inicia-se a temperaturas entre 200 °C e 280 °C e apresenta-se com uma degradação progressiva que inclui despolimerização e desidratação. A temperaturas superiores a 280 °C ocorre uma rápida volatilização dos componentes químicos



(FENGEL; WEGENER, 1989). Também foi observado o retardamento, pelo teor de umidade na degradação térmica da celulose (ROFFAEL; SCHALLER, 1971).

Segundo Dirol (1993), a degradação térmica da celulose pode ocorrer de dois modos: a temperaturas abaixo de 300 °C e a temperaturas acima de 300 °C. Na degradação a temperaturas abaixo de 300 °C ocorrem despolimerização da celulose por quebras das ligações, desidratação, formação de radicais livres, formação de grupos carbonilos e hidroperóxido e, finalmente, evolução de CO e CO<sub>2</sub>.

Na degradação da celulose a temperaturas acima de 300 °C, ocorre uma despolimerização dela, pela fratura das ligações da cadeia principal (transglicosilação). A transglicosilação ocorre sempre em conjunto com a desidratação da celulose e da hemicelulose, gerando diferentes compostos químicos, tal como o furfural. O furfural é um polímero que melhora a estabilidade dimensional da madeira, tornando-a menos higroscópica. Entre 550 °C e 600 °C, existe uma perda de massa da celulose superior a 80% (BARTKOWIAK; ZAKRZEWSKI, 2004).

### 2.7.2 Degradação térmica da hemicelulose

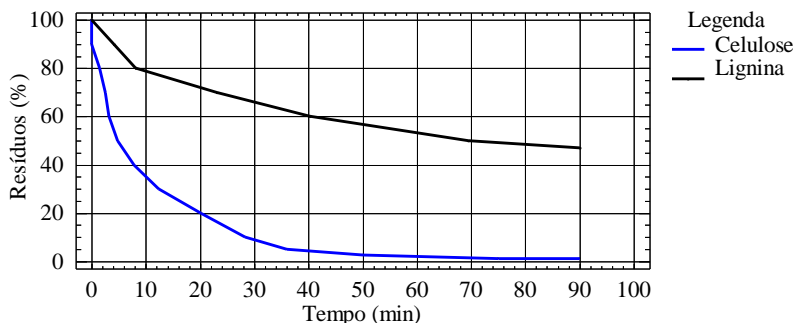
Em geral, a degradação térmica da hemicelulose melhora a estabilidade dimensional da madeira (BURMESTER, 1975; FENGEL; WEGENER, 1989). A hemicelulose apresenta uma menor estabilidade térmica do que a celulose quando submetidas a altas temperaturas, devida, possivelmente, à sua estrutura não cristalina e à sua diversidade estrutural.

A degradação térmica da hemicelulose inicia-se entre 160 °C e 260 °C devida às suas estruturas ramificadas e a seu baixo peso molecular, o que facilita a sua rápida degradação, quando comparada a outros componentes químicos da madeira (FENGEL; WEGENER, 1989; BEKHTA; NIEMZ, 2003). Schniewind (1985) observou que as hemiceluloses degradam a temperaturas entre 200 °C e 260 °C, levando a perdas de massa da hemicelulose, que podem atingir mais de 95% até 600 °C (BARTKOWIAK; ZAKRZEWSKI, 2004).

### 2.7.3 Degradação térmica da lignina

Segundo Schniewind (1985), as reações de desidratação são as responsáveis pela degradação térmica da lignina. Reações exotérmicas ocorrem em torno de 200 °C, já entre 150 °C e 300 °C ocorre o rompimento das ligações de carbono (C-O-C e C-C). Em torno de 300 °C, as ligações laterais alifáticas começam a romper fora do anel aromático. Com a degradação térmica da lignina, ocorrem reações exotérmicas entre 225 °C e 450 °C. A lignina degrada, gradualmente, numa maior faixa de temperaturas do que os carboidratos. As perdas de massa da lignina não excedem 60% a 600 °C, (BARTKOWIAK; ZAKRZEWSKI, 2004).

A **Figura 14** ilustra a porcentagem do resíduo de amostras de celulose e de lignina, em função do tempo de aquecimento quando aquecidas no forno elétrico da temperatura ambiente até 300 °C. Pode-se observar que a lignina necessita de cerca de 70 minutos de exposição para ter seu peso reduzido à metade, enquanto que o tempo necessário para que isso ocorra para a celulose é de cerca de 5 minutos. Com 90 minutos de aquecimento, a celulose praticamente não deixa resíduos, enquanto que a lignina deixa um teor ainda por volta de 47% do peso inicial. Observa-se que a lignina é mais resistente à degradação térmica do que a celulose, devido, principalmente aos seus arranjos, peso molecular e composição química (BRITO; BARRICHELO, 2001).



**Figura 14:** Resíduo de lignina e celulose da madeira (BRITO; BARRICHELO, 2001).

A partir da revisão bibliográfica feita sobre a influência da temperatura sobre a madeira e seus polímeros, elaborou-se a **Tabela 4**, com as observações mais relevantes.

**Tabela 4:** Alterações dos polímeros da madeira devido à temperatura.

	Alterações		Fonte e ano
Até 100 °C	Saída de extrativos e mudança de cor	Saem os taninos hidrossolúveis da madeira e inicia-se a degradação deles.	Charrier et al. (1995) Burtin et al. (1998)
		Ocorrem de mudanças químicas e físicas, atribuídas à emissão da água e extrativos tais como terpenos.	Manninen et al. (2002) Sundqvist (2004)
		Inicia-se a mudança de cor da madeira. As madeiras resinosas tornam-se ligeiramente mais escuras que as folhosas.	Brauner e Loos (1968) McMillen (1976) Schmidt (1986)
		Inicia-se a mudança de cor devido à hidrólise dos hidratos de carbono, ceras e aos extrativos.	Fengel (1966) Charrier et al. (1995) Burtin et al. (1998)
	Celulose	Degrada-se a celulose, influenciada negativamente pelo teor de umidade.	Roffael e Schaller (1971)
	Hemicelulose	Começa do amolecimento.	Schaffer (1973)
	Lignina	Altera-se a estrutura da lignina.	
100 – 150 °C	Saída de água e mudança de cor	Evapora-se a água de impregnação.	Schaffer (1973) Kozlit (1968)
		Iniciam-se mudanças significativas de cor.	Schneider (1971) e (1973)
	Celulose	A celulose decompõe-se termicamente devido às reações de despolimerização (hidrólise).	Gerhard (1979), (1982) e (1983)
			Koch (1985)
	Hemicelulose	Há perda de massa.	Kollman e Fengel (1965)
	Lignina	Ocorre mudança em sua estrutura, devido à saída de umidade.	Košíková et al. (1999)
150 – 200 °C	Extrativos	Saem gases combustíveis tais como terpenos e ceras em geral.	Westermark et al. (1995) Kacík et al. (1999)
	Celulose	Aumenta a cristalinidade da celulose pura e muda do grau de polimerização da celulose isolada.	Manninen et al. (2002)
		Ocorre a transição vítrea da celulose amorfa.	Roffael e Schaller (1971) Bhuiyan et al. (2000)
	Hemicelulose	Aumenta a solubilidade em amostras aquecidas em água.	Yano et al. (1976)
		Degradação significativa.	Mangalam A. (2005)
			Stamm (1956)
			Kollman e Fengel (1965)
			Fengel (1967)
			Tjeerdsma et al. 1998
			Sivonen et al. 2002

**Tabela 5:** Alterações dos polímeros da madeira devido à temperatura (continuação).

150 – 200 °C	Lignina	Transição vítrea de várias espécies.	Salmen, L (1982)
		Endurece novamente.	Schaffer (1973)
200 – 250 °C	Celulose	Transição vítrea para amostras seca.	Kargin. et al. (1960) Yano et al. (1976) Salmen, L. (1982)
		Aumento da cristalinidade.	Sivonen et al. (2002)
	Hemicelulose	Transição vítrea em amostras seca e isolada.	Salmen, L. (1982)
		Degradação térmica.	Garrote et al. (1999)
	Lignina	Aumento forte da taxa de degradação da lignina.	Sivonen et al. (2002) Mangalam A. (2005)
250 – 400 °C	Celulose	Despolimerização, desidratação e formação de radicais livres. Perda até um 83% de seu peso.	Mangalam A. (2005)
	Hemicelulose	Degradação completa.	Schaffer (1973)

#### 2.7.4 Conclusões parciais

Em geral, quando a celulose, a hemicelulose e a lignina são submetidas à temperatura, ocorre degradação térmica desses elementos. Este processo de degradação térmica reflete-se na perda de umidade e na perda de massa. A degradação térmica da celulose ocorre entre 200 °C e 280 °C, a hemicelulose entre 160 °C e 260 °C e a lignina ocorre em torno de 150 °C e 300 °C. Próximo de 300 °C existe um rompimento das ligações de carbono e as ligações laterais alifáticas começam a romper fora do anel aromático. Quando a celulose e hemicelulose são submetidas até 600 °C, as perdas de massa são de 80% e 95%, respectivamente.

Para temperaturas acima de 100 °C, as ligações químicas dos componentes da madeira começam a se romper. Entre 100 °C e 200 °C, há liberação de água, óxidos de carbono e vestígios de produtos biológicos. Acima de 200 °C, aumentam as reações químicas exotérmicas. Na faixa de 280 °C até 300 °C, considerada como temperatura de ignição e de pirólise rápida, há eliminação de gases.

## 2.8 TRANSIÇÃO VÍTREA DOS POLÍMEROS DA MADEIRA

Muitos autores estudaram a transição vítrea da celulose, hemicelulose e lignina e constataram que ela é influenciada pelo teor de umidade do material ((FENGEL, 1967; ALFTHAN; DE RUVO, 1973; HATAKEYAMA et al., 1974; KLASON; KUBAT, 1976; ZERONIAN; MENEFEE, 1976; YANO et al., 1976; KAIMIN et al., 1979; SALMEN, 1979; YANG; GORING, 1980; JAKOBSON; ERINSZ, 1981; SALMEN, 1982; BACK; SALMEN, 1982; IRVINE, 1984; FENGEL; WEGENER, 1989; KOTILAINEN, 2000; BHUIYAN et al., 2000; SIVONEN et al., 2002; WEILAND; GUYONNET 2001; WIKBERG; MAUNU, 2004; MANGALAM, 2005; PONCSÁK et al., 2006). Para a determinação da temperatura de transição vítrea dos polímeros, foram utilizadas técnicas de análise com DTA ou pelo método calorimétrico e espectrometria de infravermelho.

A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) é a passagem de um estado ordenado rígido (vítreo) do polímero para um estado desordenado no qual as cadeias poliméricas possuem uma mobilidade maior (polímero amolece). Essa mobilidade, no caso de algumas classes de polímeros naturais, como a celulose, hemicelulose e a lignina, dão origem ao comportamento plástico (SALMEN, 1982).

O valor da temperatura de transição vítrea dos polímeros da madeira sofre algumas variações dependendo da técnica usada para medi-la, não sendo um ponto termodinâmico fixo. Uma série de fatores influencia a transição vítrea. Dentre eles pode-se destacar: a taxa de aquecimento (ou de resfriamento), o grau de cristalinidade; o grau de polimerização e peso molecular, porém tais variações se limitam a um intervalo de temperatura não muito extenso. No caso da lignina, o teor de umidade possui um efeito significativo na temperatura de amolecimento, que decresce com o aumento do teor de umidade (BACK; SALMEN, 1982).

Em geral, pode-se afirmar que, para celulose, a temperatura de transição vítrea se situa entre 200 °C e 250 °C. Para a hemicelulose, é observada na faixa entre 150 °C e 220 °C e, para a lignina, na faixa entre 180 °C e 200 °C (BACK; SALMEN, 1982; IRVINE, 1984).

A **Tabela 6** sintetiza os resultados que vários autores desenvolveram sobre a transição vítrea da celulose, da hemicelulose e da lignina devido à temperatura. A maioria dos estudos foi realizada com amostras em estado seco.

Tabela 6: Temperatura de transição vítrea dos polímeros da madeira.

Polímeros da madeira	Temperatura de transição vítrea, material seco (°C)	Fonte e ano
Celulose	120 a 280	Kaimin et al. (1979); Yano et al. (1976); Zeronian e Mennefee (1976); Kaimin et al. (1979); Beall e Eickner (1970); Salmen (1982)
Hemicelulose	150 a 220	Alfthan (1973) e Salmen (1979); Salemn (1982); Beall e Eickner (1970)
Lignina	60 e 90 (PSF)	Irvine (1984)
	124 e 193	Salmen (1982)
	220	Becker et al. (1977)
Lignina de abeto (extraída com periodato)	193	Sarkanen et al. (1971) Sjostron (1993)
Lignina bétula (extraída com periodato)	179	
Lignina abeto (extraída com dioxano)	127	
Lignina álamo (extraída com dioxano)	134	

Na **Figura 15** são apresentadas as temperaturas de transição vítrea da celulose, da hemicelulose e da lignina em estado seco. Observou-se que as temperaturas mais altas de transição vítrea correspondem à celulose e as menores à lignina (BACK; SALMEN, 1982).

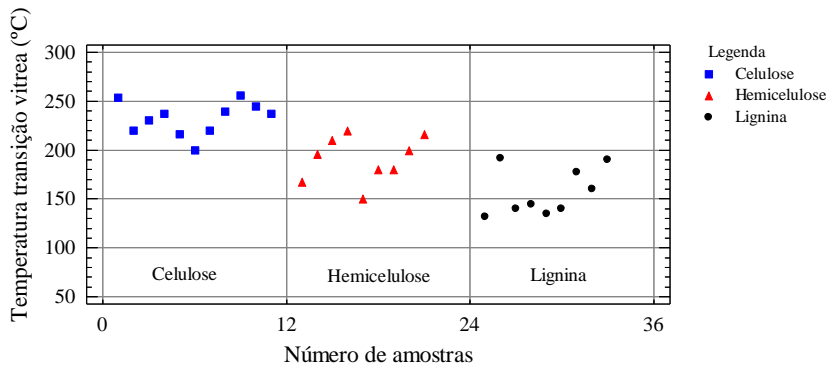
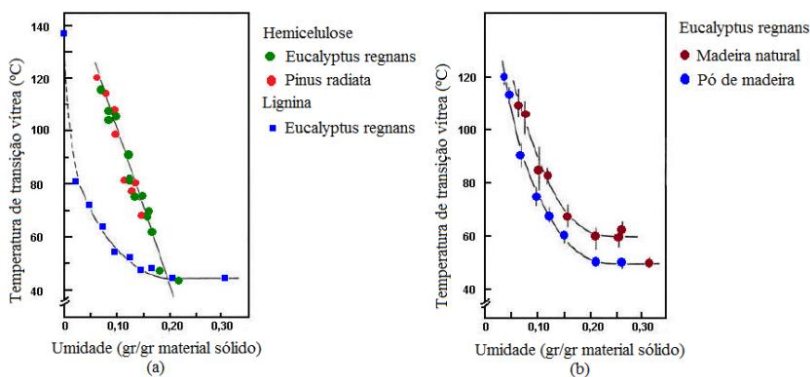


Figura 15: Transição vítrea dos componentes da madeira.

### 2.8.1 Fatores que influenciam a transição vítrea dos polímeros da madeira

Existem dois fatores principais que influenciam a transição vítrea da lignina o peso molecular e o teor de umidade. Segundo Goring (1963), Zeronian; Menefee (1976) a transição vítrea da lignina é influenciada pelo peso molecular, em decorrência do aumento do grau de ligações cruzadas. Já o teor de umidade possui um efeito significativo na temperatura de transição vítrea da lignina. Irvine (1984) constatou que a temperatura de transição vítrea diminui quando o teor de umidade aumenta. A **Figura 16** mostra a influência da umidade na madeira natural e no pó da madeira de *Eucalyptus regnans* e de *Pinus radiata* na temperatura de transição vítrea da hemicelulose e da lignina.



**Figura 16:** Transição vítrea da lignina e hemicelulose (IRVINE, 1984).

### 2.8.2 Conclusões parciais

Este item apresenta uma revisão bibliográfica abrangente sobre a temperatura de transição vítrea e os fatores que influenciam a temperatura de transição vítrea dos polímeros da madeira. Constatou-se que a temperatura de transição vítrea da lignina é influenciada pelo peso molecular e pelo teor de umidade desse material. Enquanto que a das hemiceluloses é influenciada somente pelo teor de umidade.

Em geral, pode-se afirmar que para celulose seca, a temperatura de transição vítrea situa-se entre 200 °C e 250 °C, para a hemicelulose

seca, é observada na faixa entre 150 °C e 220 °C e para a lignina seca, na faixa entre 180 °C e 200 °C.

A mudança da cristalinidade da celulose tem uma influência sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Foi constatado por vários autores que acima de 200 °C produz-se um aumento da cristalinidade da celulose.

## 2.9 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

Muitos estudos têm mostrado a influência da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira. Porém alguns resultados, até o momento, mostraram-se contraditórios em alguns aspectos, principalmente no que diz respeito aos benefícios ou prejuízos causados pela temperatura. Essa divergência pode estar relacionada aos diferentes métodos de ensaio usados no desenvolvimento dos estudos.

Um pequeno número de pesquisadores não encontrou alterações significativas nas propriedades mecânicas da madeira devido à temperatura (LADELL, 1953; COMBEM, 1955; PETRI; ANANYIN, 1960; SCHNEIDER, 1973; YAO; TAYLOR, 1979). Porém, a grande maioria apresentou resultados nos quais a temperatura exerce influência significativa nas propriedades mecânicas da madeira (SANO, 1961; SCHAFFER, 1967; KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; PREUSSER, 1968; SALAMON, 1969; KNUDSON; SCHNIEWIND, 1975; OHSAWA; YONEDA, 1978; LAU; BARRETT, 1979; CHAFE, 1979; NYMAN, 1980; GERHARDS, 1982; GERHARDS, 1983; HILLIS, 1984; OSTMAN, 1985; SCHAFFER, 1986; ZHOU; SMITH, 1991; SEHLSTEDT; PERSSON, 1995; TJEERDSMA, 1998; GREEN et al., 1999; MILOTA, 2000; KUBOJIMA et al., 2000; TERZIEV; DANIEL, 2002; THIAM et al., 2002; BEKHTA; NIEMZ, 2003; MÜLLER et al., 2003; MORAES, 2004; MORAES, et al., 2005; JUNKKONEN; HERÄJÄRVI, 2006; PONCSÁK et al., 2006; FRÜHWALD, 2007; PESCADOR, et al., 2008; MANRÍQUEZ; MORAES, 2008,2, 2009a e b, 2010).

A exposição da madeira a altas temperaturas causa efeitos transitórios e permanentes. O aquecimento da madeira por curtos períodos de tempo causa a redução temporária da resistência mecânica que é recobrada quando a temperatura volta ao normal. Se a exposição a altas temperaturas é mantida por um período prolongado de tempo, os



efeitos na madeira são permanentes (ATREYA, 1983; BRYDEN, 1998; BROWNE, 1958; MILLER; BELLAN, 1996; SHAFIZADEH, 1985).

O tratamento térmico da madeira é conhecido há muito tempo como um método efetivo para modificar as suas propriedades físicas (RUNKEL; WITT, 1953; SEBORG et al., 1953; STAMM, 1956; KOLLMANN; SCHNEIDER, 1963; KOLLMANN; FENGEL, 1965; NOACK, 1969; HILIS 1984). Segundo Thiam et al. (2002), quando a madeira é submetida a temperaturas elevadas, as propriedades mecânicas de madeira são afetadas de três modos: o efeito direto de perda de umidade, o surgimento de tensões internas nas fibras da madeira e a formação de fendas internas na parede celular e a degradação térmica dos polímeros, dentre outros.

Salamon (1969) observou que os efeitos, entre 25 °C e 100 °C, sobre as propriedades mecânicas da madeira variam de acordo com a espécie e o carregamento aplicado. Algumas espécies não apresentaram diminuição de resistência, enquanto outras apresentam entre 7% e 20% de redução de resistência em comparação com valores obtidos à temperatura ambiente.

Segundo Chafe (1979), a redução da resistência da madeira tem relação com a degradação térmica de seus polímeros. Segundo Gerhards (1982), Kollman e Côte (1968), Green et al. (1999), a resistência da madeira é relacionada em forma inversa à temperatura. Porém pouca influência foi encontrada na flexão estática (GERHARDS, 1983).

Milota (2000) aqueceu amostras de cicutia oriental e abeto a 80 °C 116 °C e 132 °C e observou uma redução na resistência mecânica entre 40% e 50%. Frühwald (2007) realizou ensaios com espécies de abeto vermelho e pinho, em amostras com 6% de teor de umidade. Elas foram aquecidas a 80 °C, 120 °C e 170 °C. Amostras da mesma espécie foram tratadas a 190 °C e 210 °C. Os resultados indicam que a temperatura afeta as propriedades de compressão e de tração paralela às fibras, mas os resultados foram distintos para as diferentes espécies estudadas. Manríquez (2008) estudou a espécie paricá (*Schizolobium amazonicum*), oriunda de florestas plantadas da Região Amazônica. Nesse estudo foram realizados ensaios de compressão, tração, cisalhamento paralelo às fibras e embutimento paralelo e perpendicular às fibras, entre 20 °C e 230 °C, pelo meio dos quais se constatou que a temperatura influencia diretamente a redução da resistência mecânica da madeira.

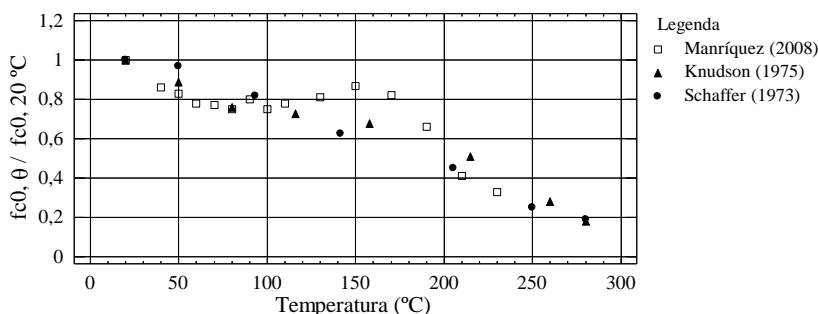
A seguir, são apresentados os resultados da influência da temperatura sobre as resistências à compressão, à tração, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras da

madeira, todos eles normalizados em relação àqueles obtidos à temperatura ambiente.

### 2.9.1 Resistência à compressão paralela às fibras

Vários autores realizaram trabalhos sobre a influência da temperatura na resistência à compressão paralela às fibras da madeira (SCHAFER, 1973; KNUDSON; SCHNIEWIND, 1975; GERHARDS, 1982; THOMAS; BUCHANAN, 1995; YOUNG; CLANCY, 2001; MANRÍQUEZ, 2008, 2010). Eles constataram que existe uma diminuição significativa na resistência à compressão paralela às fibras.

Na **Figura 17**, são apresentados os resultados médios relativos obtidos por Schaffer (1973), Knudson e Schniewind (1975) e Manríquez (2008) para as espécies *Pseudotsuga menziesii*, *Douglas fir* e *Schizolobium amazonicum*, respectivamente. Knudson e Schniewind (1975) utilizaram amostras com teor de umidade de 12%, corpos de prova de dimensões 4,8 mm × 4,8 mm × 19 mm, aquecidos por placas quentes colocadas na superfície dos corpos de prova durante 5 min a 20 min. Manríquez (2008) utilizou amostras com teor de umidade de 12%, com os corpos de prova de 5 cm × 5 cm × 15 cm, aquecidos no forno elétrico durante 180 min. Os resultados obtidos por ambos pesquisadores foram similares, detectando diferenças apenas em torno de 150 °C. Este fenômeno pode estar associado ao tamanho dos corpos de prova e ao modo como eles foram aquecidos.

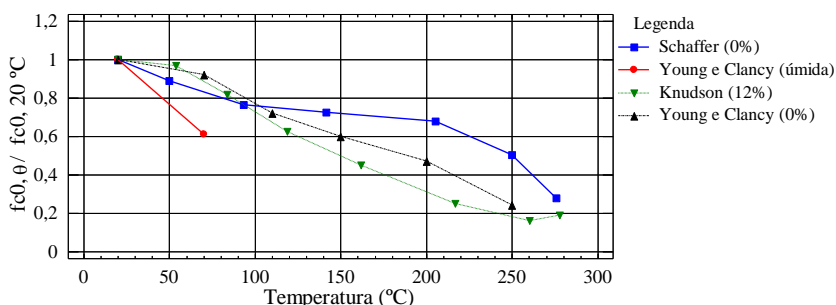


**Figura 17:** Compressão paralela relativa às fibras.

Na faixa de 25 °C e 50 °C, os resultados apresentados por Schaffer (1973) são superiores aos obtidos por Manríquez (2008). Esta diferença pode estar associada ao teor de umidade das amostras.

Aquelas utilizadas por Schaffer (1973) apresentavam teor de umidade de 0%, enquanto as de Manríquez (2008) apresentavam 10% nesse nível de temperatura. A partir de 140 °C, os resultados apresentados por Schaffer (1973) são inferiores aos dos outros autores devido, provavelmente, à umidade de 0% dos corpos de prova. O baixo teor de umidade dos corpos de prova ocasiona uma rápida degradação dos componentes químicos da madeira. Acima de 200 °C, obteve-se uma perda de resistência percentual aproximada de 50% e um comportamento aproximadamente linear para os três autores.

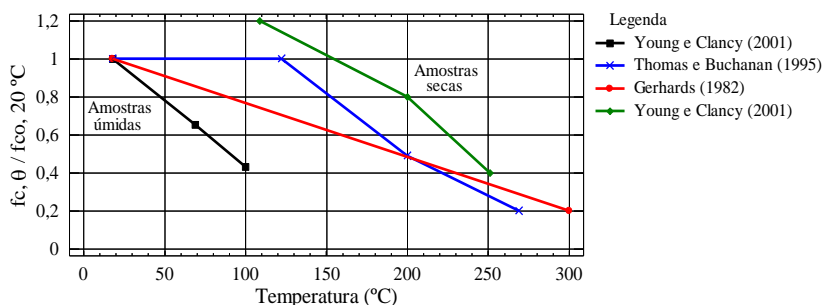
Na **Figura 18**, observa-se a influência do teor de umidade sobre a compressão paralela às fibras. Em seus estudos, Schaffer (1973) utilizou amostras com 0% de umidade, Knudson e Schniewind (1975) amostras com 12% de umidade e Young e Clancy (2001) amostras úmidas e secas. Observa-se que a resistência à compressão paralela às fibras dos corpos de prova de madeira seca é maior que a dos corpos de prova feitos com madeira úmida conforme esperado.



**Figura 18:** Efeito da temperatura e umidade na resistência à compressão paralela às fibras.

A **Figura 19** apresenta os valores relativos à resistência à compressão paralela às fibras (GERHARDS, 1982; THOMAS; BUCHANAN, 1995; YOUNG; CLANCY, 2001). Gerhards (1982) utilizou amostras secas, com 5 mm × 5 mm de seção transversal, enquanto Young e Clancy (2001) utilizaram corpos de prova de 90 mm × 90 mm × 300 mm de *Pinus radiata* para amostras secas e úmidas. Não foram encontradas informações sobre os corpos de prova utilizados por Thomas e Buchanan (1995). Acima de 100 °C, as diferentes amostras apresentam comportamentos diferentes. Para amostras secas e

temperatura acima de 100 °C, os resultados obtidos por Gerhards (1982) são inferiores aos outros autores.

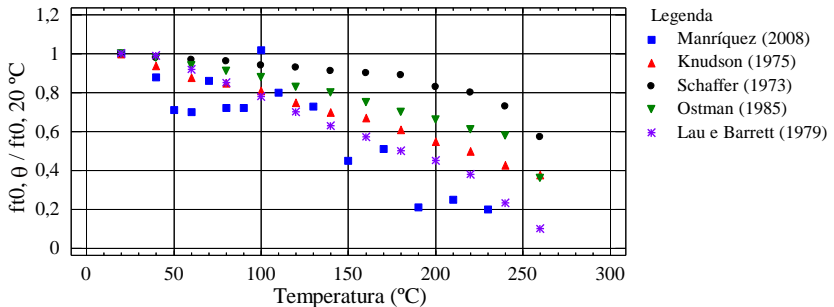


**Figura 19:** Resistência relativa à compressão paralela às fibras da madeira.

## 2.9.2 Resistência à tração paralela às fibras

Vários autores realizaram trabalhos sobre a influência da temperatura sobre a resistência à tração paralela às fibras da madeira, cujos resultados são apresentados na **Figura 20** (SCHAFFER, 1973; KNUDSON; SCHNIEWIND, 1975; LAU; BARRETT, 1979; OSTMAN, 1985; SCHAFFER, 1986; MANRÍQUEZ, 2008). Schaffer (1973) estudou a espécie *Pseudotsuga menziesii* com teor de umidade de 0% e massa específica entre 432 kg/m<sup>3</sup> e 522 kg/m<sup>3</sup> usando corpos de prova de 3,2 mm de espessura e 25,4 mm de largura. Lau e Barrett (1979) realizaram ensaios com corpos de prova de *Pinus sylvestris* com 90 mm × 35 mm, massa específica entre 500 kg/m<sup>3</sup> e 590 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade entre 7% e 11%, aquecidos por 25 min. Knudson e Schniewind (1975) utilizaram amostras da espécie *Pseudotsuga menziesii*, com 12% de teor de umidade e massa específica entre 420 kg/m<sup>3</sup> e 570 kg/m<sup>3</sup>, cuja seção transversal era de 3/16 polegadas, de acordo norma ASTM D143. Ostman (1985) estudou o comportamento do abeto vermelho, com teor de umidade de 12% e massa específica entre 400 kg/m<sup>3</sup> e 490 kg/m<sup>3</sup>, com corpos de prova de seção 1 mm × 10 mm. Manríquez (2008) estudou a espécie *Schizolobium amazonicum* com teor de umidade de 12% e massa específica entre 283 kg/m<sup>3</sup> e 443 kg/m<sup>3</sup> e corpos de prova de seção 5 mm × 20 mm. Os resultados obtidos por Schaffer (1973) são superiores àqueles apresentados pelos outros autores, devido, provavelmente, ao teor de umidade inicial dos corpos de prova utilizados. Observou-se que os resultados obtidos por Knudson

e Schniewind (1975) são superiores aos obtidos por Manríquez (2008). Lau e Barrett (1979) e Ostman (1985) estão próximos daqueles obtidos por Manríquez (2008), embora as espécies estudadas por eles apresentassem características físicas e anatômicas diferentes. Segundo Ifju (1964), a resistência à tração paralela às fibras depende fortemente da fração de celulose na madeira.

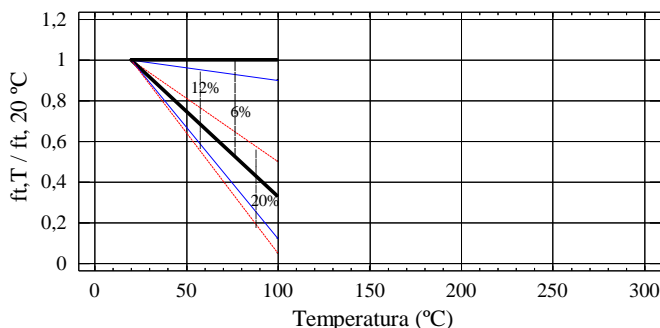


**Figura 20:** Resistência relativa à tração paralela às fibras.

Gerhards (1979) constatou, para amostras de abeto, em temperaturas até 110 °C, que a resistência à tração diminui 10% com relação à resistência obtida à temperatura ambiente. Outros autores observarem perdas mais elevadas na resistência à tração paralela às fibras, de até 50% com relação à resistência obtida à temperatura ambiente ao mesmo nível de temperatura (KOZLIK, 1976; KIFETEW et al., 1998; THUVANDER et al., 2001).

### 2.9.3 Resistência à tração perpendicular às fibras

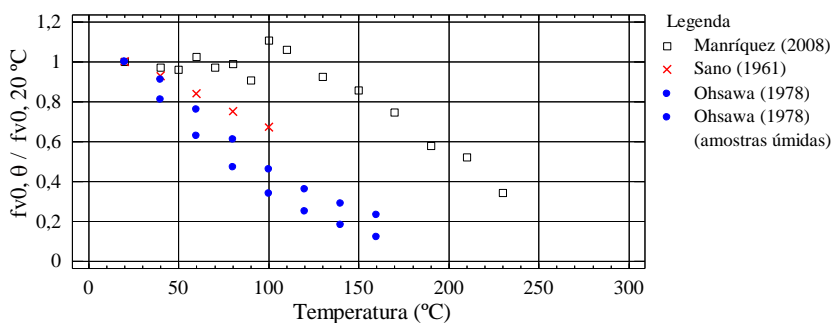
A **Figura 21** apresenta o comportamento da resistência à tração perpendicular às fibras na faixa de 20 °C a 100 °C, cujos resultados são oriundos do trabalho de Gerhards (1982). São apresentados resultados com três teores de umidade: 6%, 12% e 20%, que apresentam superposição dos seus intervalos. As faixas que contém uma maior superposição correspondem aos teores de 6% e 12% de umidade.



**Figura 21:** Influência da temperatura na resistência à tração perpendicular às fibras.

#### 2.9.4 Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

Vários autores realizaram trabalhos sobre a influência da temperatura na resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira (SANO, 1961; OHSAWA; YONEDA, 1978; GERHARDS, 1982; MANRÍQUEZ, 2008). Na **Figura 22** são apresentados os resultados de resistência ao cisalhamento normalizado em relação à temperatura ambiente obtidos por Ohsawa e Yoneda (1978) com amostras úmidas e por Sano (1961) com amostras secas, que foram apresentados por Gerhards (1982) e Manríquez (2008) com 12% de teor de umidade.



**Figura 22:** Resistência relativa ao cisalhamento paralela às fibras.

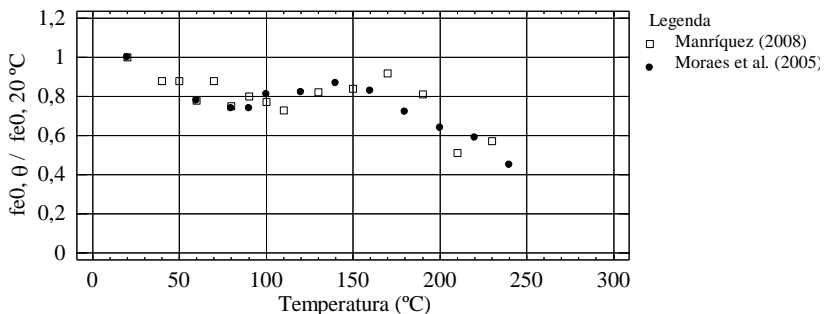
Os resultados obtidos por Manríquez (2008) diferem consideravelmente daqueles encontrados na literatura. Provavelmente, essa diferença esteja relacionada com a metodologia de ensaio e o teor

de umidade da madeira no momento do ensaio. Manríquez (2008) utilizou corpos de prova com o formato proposto por Szűcs et al. (1998), enquanto que os autores citados utilizaram corpos de prova definidos pela a norma ASTM D143. A tendência dos resultados oriundos de amostras secas, apresentados por Sano (1961), entre 20 °C e 100 °C, é similar à tendência dos resultados obtidos por Manríquez (2008) entre 150 °C e 230 °C, quando as amostras estavam com um 0% de teor de umidade.

### 2.9.5 Resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras

Poucos trabalhos foram encontrados na literatura sobre a influência da temperatura na resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras da madeira (MORAES et al., 2005; MANRÍQUEZ, 2008). Moraes et al. (2005) utilizaram amostras de *Pinus sylvestris* com massa específica entre 489 kg/m<sup>3</sup> e 680 kg/m<sup>3</sup> e teor de umidade de 11% à temperatura ambiente. Manríquez (2008) utilizou amostras de *Schizolobium amazonicum* com teor de umidade de 12% e massa específica entre 303 kg/m<sup>3</sup> e 454 kg/m<sup>3</sup>. As dimensões dos corpos de prova de ambos os autores eram de 2,5 cm × 60 cm × 14 cm, definidos conforme a norma NF EN 383 (1993).

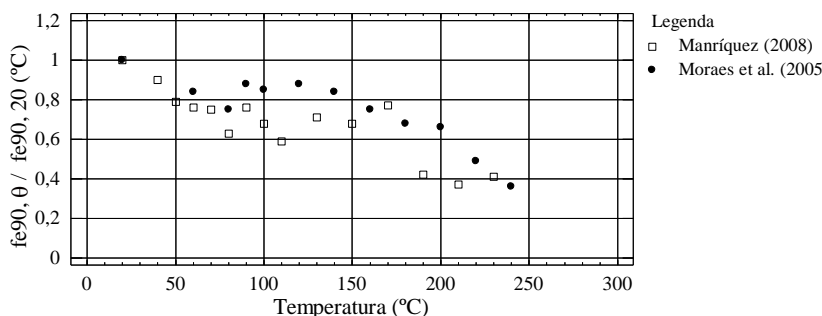
As **Figuras 23 e 24** apresentam as resistências relativas ao embutimento paralelo ( $f_{e0,\theta}$ ) e perpendicular ( $f_{e90,\theta}$ ) às fibras da madeira, respectivamente. Os resultados obtidos por Manríquez (2008) são similares aos obtidos por Moraes et al. (2005) para embutimento paralelo ( $f_{e0,\theta}$ ).



**Figura 23:** Resistência relativa ao embutimento paralelo às fibras.

Esses pesquisadores verificaram que a umidade e a temperatura influenciam, consideravelmente, na resistência ao embutimento da madeira, assim como em outras propriedades mecânicas, conforme mencionado por Schaffer (1973), Knudson e Schniewind (1975), Lau e Barrett (1979), Gerhards (1982) e Ostman (1985).

Para o embutimento perpendicular ( $f_{e90,0}$ ), as diferenças entre os resultados obtidos por Manríquez (2008) e Moraes et al. (2005) são maiores. Elas podem estar associadas às características anatômicas das espécies utilizadas nos ensaios. A espécie estudada por Moraes et al. (2005) é uma resinosa enquanto a de Manríquez (2008) é uma folhosa. Percebe-se que, em torno de 80 °C ocorre uma redução de aproximadamente 25% da resistência média ao embutimento da madeira em relação aos valores a 20 °C. Esta redução pode chegar a quase 60% a 240 °C.



**Figura 24:** Resistência relativa ao embutimento perpendicular às fibras.

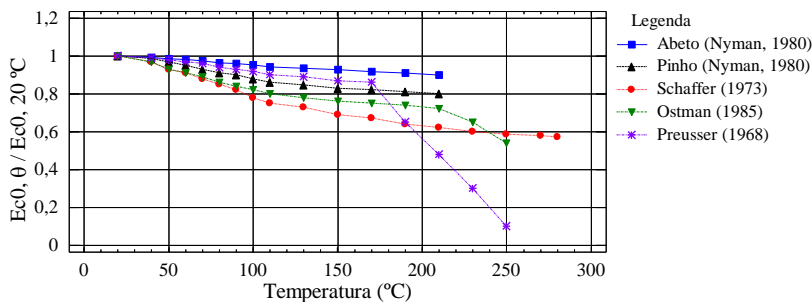
### 2.9.6 Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras

Vários autores realizaram trabalhos sobre a influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade da madeira (PREUSSER, 1968; SCHAFFER, 1973; NYMAN, 1980; GERHARDS, 1982; OSTMAN, 1985).

A **Figura 25** apresenta valores do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras normalizadas em relação aos valores a 20 °C. Os resultados mostram que o efeito da temperatura sobre o módulo de elasticidade apresenta um comportamento aproximadamente linear até os 180 °C e 200 °C. Preusser (1968), apud Gerhards (1982), mostra valores próximos a zero a 250 °C, enquanto os resultados apresentados



por outros autores ainda têm uma porcentagem entre 50% e 70% relativa ao módulo da elasticidade.



**Figura 25:** Módulo de elasticidade relativa à compressão (adaptado de GERHARDS, 1982).

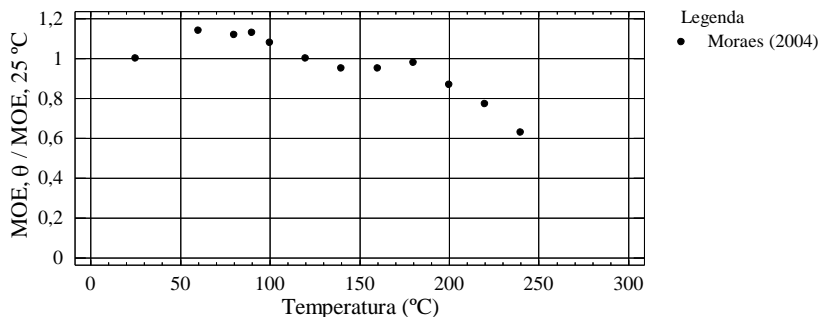
### 2.9.7 Módulo de elasticidade à flexão

Vários trabalhos foram encontrados sobre a influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade na flexão (MOE) que mostram que o módulo de elasticidade na flexão é afetado com o aumento da temperatura (THOMPSON, 1969; GERHARDS, 1979; TEISCHINGER, 1992; KUBOJIMA et al., 2000; BENGTSSON; BETZOLD, 2000; KUBOJIMA et al., 2000; MORAES et al., 2004).

Kubojima et al. (2000) mostraram, para amostras de abeto vermelho a 160 °C aquecidas durante 0,5 horas até 16 horas, que o MOE aumenta com o tratamento térmico, porém, a resistência diminui com um maior tempo de exposição ao calor. Por sua vez Bengtsson e Betzold (2000), também utilizando amostras da mesma espécie em diferentes níveis de temperaturas (70 °C, 75 °C e 120 °C), mostraram que a resistência à flexão diminui entre 9,5% e 11,5%. Teischinger (1992) e Gerhards (1979) constataram que a temperatura não influencia o MOE de abeto (*Picea abies*) até 110 °C.

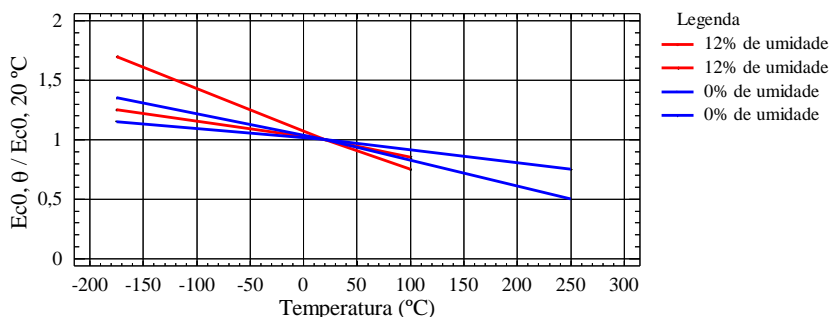
Na **Figura 26** são apresentados os resultados dos valores médios do MOE normalizado em relação ao valor a 20 °C obtido por Moraes et al. (2004). Os autores realizaram ensaios à flexão em três pontos, usando micro corpos de prova da espécie *Pinus sylvestris* de dimensões 0,43 cm × 5 mm × 20 mm. Na faixa de 25 °C e 100 °C, foram obtidos valores relativos superiores em quase 20%, isto pode ser atribuído à

perda de umidade durante o ensaio causado pelas dimensões reduzidas dos corpos de prova. Thompson (1969) mostrou, por meio de um estudo com espécimes de pinheiro submetidos a temperaturas de 66 °C e 83 °C, que o MOE reduz com o aumento da temperatura entre 8% e 12%.



**Figura 26:** Módulo de elasticidade relativo à flexão.

Na **Figura 27** são apresentados os resultados do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras obtidas por vários autores. Uma faixa entre -175 °C e 100 °C para amostras com 0% de umidade e outra entre -175 °C e 250 °C, para amostras com 12% de umidade, normalizadas em relação aos valores médios obtidos a 20 °C. Observou-se que a redução do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras para as amostras com 12% de umidade, é menor do que aquelas que apresentam 0% de umidade.



**Figura 27:** Módulo de elasticidade relativa à compressão paralela às fibras (adaptado de GREEN et al., 1999).

## 2.9.8 Módulo de ruptura na flexão

Poucos trabalhos foram encontrados na literatura sobre a influência da temperatura sobre o módulo de ruptura na flexão (SCHNEIDER, 1973; TEISCHINGER, 1992; KUBOJIMA et al., 2000; BEKHTA; NIEMZ, 2003). Schneider (1973) encontrou uma redução pequena no módulo de ruptura na flexão, para amostras de pinho de escócia aquecida entre 130 °C e 180 °C. Teischinger (1992) constatou que a temperatura tem uma menor influência nas propriedades MOR para amostras de abeto (*Picea abies*) em relação às outras propriedades mecânicas. Kubojima et al. (2000) constataram, por meio de ensaios com amostras de abeto vermelho aquecidas de meia hora a 16 horas, a 160 °C, que o MOR diminui fortemente com a temperatura na medida em que o tempo de exposição ao calor aumenta. Bekhta e Niemz (2003) aqueceram amostras de abeto vermelho a 100 °C, 150 °C e 200 °C por períodos de tempos diferentes. Verificaram que o módulo de ruptura na flexão MOR diminui com o aumento da temperatura e a ruptura dos corpos de prova é do tipo frágil.

## 2.9.9 Conclusões parciais

Foi apresentada uma revisão bibliográfica abrangente sobre a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira, por meio da qual foi possível constatar que a madeira apresenta a redução do teor de umidade que diminui linearmente como o aumento da temperatura. A diminuição do teor de umidade e o aumento da temperatura levam ao surgimento de tensões internas e fendas na parede celular. As tensões internas e fendas na estrutura da madeira ocasionam a diminuição da resistência mecânica de suas propriedades. Esta redução pode chegar a 80% da resistência obtida à temperatura ambiente.

## 2.10 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ENSAIO PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA A FRIO E A QUENTE

Nesta seção, serão apresentados vários métodos de ensaios a frio e a quente, usados para a determinação das cinco propriedades mecânicas da madeira estudadas nesta pesquisa. As dimensões dos corpos de prova e procedimentos utilizados foram analisadas de acordo com as normas NBR 7190:1997, AFNOR (Association Française de Normalization), ASTM D143-09 (American Society for Testing and Materials), além dos procedimentos usados em pesquisas divulgadas em revistas científicas.

Com relação à metodologia utilizada no aquecimento dos corpos de provas para os diferentes níveis de temperatura, para determinação das propriedades mecânicas a temperaturas elevadas, poucos trabalhos foram encontrados na literatura especializada e essas pesquisas são apresentadas a seguir.

### 2.10.1 Caracterização da madeira em frio

As propriedades mecânicas dos materiais são determinadas recorrendo a ensaios de laboratório normalizados. Esses ensaios têm o objetivo de determinar a máxima resistência potencial que o material possa apresentar, eliminando-se seus defeitos naturais que ele apresenta, tais como nós e fibras inclinadas. Os corpos de prova apresentam as dimensões especificadas pelas normas técnicas. Essas dimensões são consideradas reduzidas se comparadas aos elementos estruturais utilizados na escala real. No entanto, são obtidos valores de referência que são utilizados no projeto estrutural. Cada país possui um órgão regulamentador que define a realização dos ensaios. No Brasil, esse órgão é a associação de Normas Técnicas (ABNT); nos Estados Unidos da América, é a American Society for Testing and Materials (ASTM); na Europa, é o European Committee for Standardization (CEN); na França é a Association Française de Normalization (AFNOR). Todas essas associações preconizam o uso de corpos de prova isentos de defeitos retirados de regiões afastadas das extremidades das peças e teor de umidade no momento dos ensaios entre 10% e 12%. Porém, as dimensões dos corpos de prova e as condições de ensaios são diferentes. Todas elas apresentam uma metodologia bem estabelecida para a

caracterização da madeira à temperatura ambiente. Contudo, nada foi encontrado sobre a normalização da madeira a temperaturas elevadas. Portanto, foi necessário realizar um levantamento na literatura técnica sobre métodos de ensaio para caracterização da madeira nessa situação.

Alguns trabalhos relacionados à determinação das propriedades mecânicas da madeira já foram desenvolvidos, comparando os resultados obtidos com corpos de prova especificados pela NBR 7190:1997 a corpos de prova especificados por outras normas técnicas de ensaios em madeiras. Martines (2002) realizou ensaios de determinação do MOE de resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras e de resistência à tração paralela às fibras, para 32 espécies de madeiras nativas, utilizando as normas NBR 7190:1997, AFNOR e ASTM D143-09. Quando foram comparados esses ensaios, o autor verificou que os resultados nas diferentes propriedades mecânicas podem ser considerados estatisticamente equivalentes para as espécies de madeira estudadas.

A seguir serão descritos os procedimentos gerais dos ensaios para a determinação da resistência mecânica da madeira.

#### 2.10.1.1 Ensaio de compressão paralela às fibras

A **Tabela 7** apresenta as dimensões dos corpos de prova, o critério para a determinação da resistência, o tamanho das amostras, a taxa de carregamento e os desenhos dos corpos de prova, para os ensaios de compressão paralela às fibras, sugeridos pelas diferentes normas técnicas. Observa-se que todos os corpos de prova apresentam a mesma seção transversal de 50 mm × 50 mm, porém os comprimentos são diferentes entre si. A norma ASTM D143-09 apresenta uma alternativa de corpos de prova com dimensões de 25 mm × 25 mm × 100 mm, para madeiras que apresentam muitos defeitos. Em geral, todas as normas recomendam o uso de corpos de prova com seção transversal de 50 mm × 50 mm, pois este formato abrange um número maior de anéis de crescimento. As normas especificam que o carregamento deve ser aplicado de forma contínua. Contudo, existem diferenças quanto à taxa de carregamento usada.

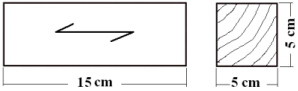
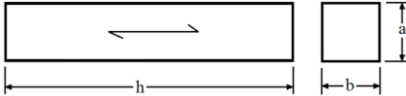
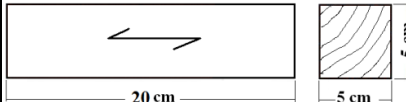
Para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras, as normas especificam que ela deve ser calculada como sendo a razão entre a força máxima aplicada e a área da seção transversal do corpo de prova.

### 2.10.1.1 Ensaio de flexão estática

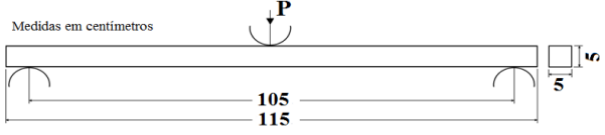
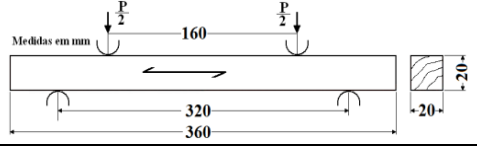
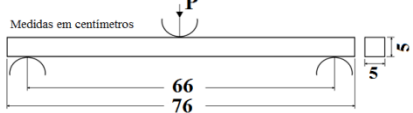
A **Tabela 8** apresenta as dimensões dos corpos de prova, o critério para a determinação da resistência, o tamanho das amostras, a taxa de carregamento e os desenhos dos corpos de prova para os ensaios de flexão estática, sugeridos pelas diferentes normas técnicas. Observa-se que existem duas formas de realização de ensaios à flexão estática: ensaio a 3 pontos e ensaio a 4 pontos. Na primeira forma, a carga concentrada é aplicada no meio do vão do corpo de prova, e, na segunda, a carga é aplicada em dois pontos equidistantes dos apoios. No ensaio a 4 pontos, a região do corpo de prova situada entre os pontos de aplicação da carga está submetida somente à flexão simples.

Observa-se que existem diferenças quanto às dimensões dos corpos de prova apresentados pelas normas. A NBR 7190:1997 e a ASTM D143-09 recomendam o uso de corpos de prova com grandes dimensões, que se aproximam das condições reais dos elementos estruturais e apresentam as heterogeneidades e os defeitos não visíveis da madeira. A AFNOR B 51-016 (1987) propõe o uso de corpos de prova de dimensões menores, resultando em menor consumo de material. Recomenda-se o segundo método, porque permite o desacoplamento do esforço cortante como momento fletor, o que permite saber se os corpos de prova apresentam falha, devido ao esforço cortante no momento fletor.

**Tabela 7:** Análise das normas técnicas de compressão paralela às fibras.

Parâmetros	Normas Técnicas		
	NBR 7190:1997	AFNOR B 51-007 (1942)	ASTM D143-09
Dimensão do corpo de prova	5 cm × 5 cm × 15 cm	Os corpos de prova devem ter comprimento nominal (h) equivalente a seis vezes a menor dimensão (a ou b) da secção transversal, com medidas em mm.	50 mm × 50 mm × 200 mm ou 25 mm × 25 mm × 200 mm
Determinação da resistência à compressão	$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A}$	$f_{c0} = \frac{F_{max}}{A}$	$\sigma_{pl} = \frac{P_{pl}}{A}$
Tamanho da amostra	6 corpos de prova	Não especifica	Não especifica
Taxa de carregamento	Carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min	A força deve ser aplicada com a velocidade contínua de modo a obter-se uma tensão de 200 a 300 kgf/cm <sup>2</sup> por minuto.	A força deve ser aplicada continuamente, de modo 0.003 mm por minuto, por milímetro do comprimento do corpo de prova.
Corpos de prova			

**Tabela 8:** Análise das normas técnicas de flexão estática.

Parâmetros	Normas Técnicas		
	NBR 7190:1997	AFNOR B 51-016 (1987)	ASTM D143-09
Dimensão do corpo de prova	5 cm × 5 cm × 115 cm	20 mm × 20 mm × 360 mm	50 mm × 50 mm × 760 mm
Determinação da resistência à flexão	$f_M = \frac{M_{max}}{W_e}$	$\sigma_{FH} = \frac{3P(l-a)}{2bh^2}$	$\sigma_{pl} = \frac{3P_{pl}}{2bh^2}$
Tamanho da amostra	6 corpos de prova	Não específica	Não específica
Taxa de carregamento	Carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min	A velocidade de carregamento deve ser tal que produza deslocamento de 6,0 mm/min	A velocidade de carregamento deve ser tal que produza deslocamento de 2,5 mm/min
Corpos de prova	NBR 7190:1997		
	AFNOR B 51-016 (1987)		
	ASTM D143-09		



### 2.10.1.2 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

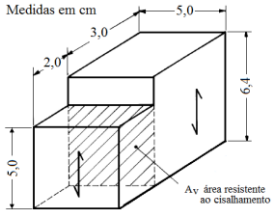
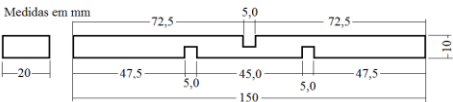
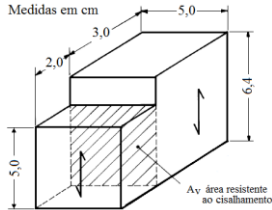
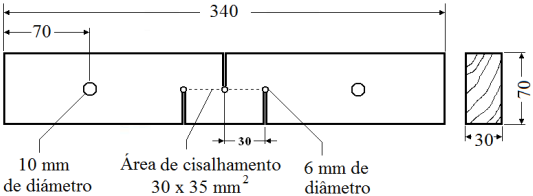
A **Tabela 9** apresenta as dimensões dos corpos de prova, o critério para a determinação da resistência, o tamanho das amostras, a taxa de carregamento e os desenhos dos corpos de prova para os ensaios de flexão estática. Observa-se que os corpos de prova propostos pelas normas NBR 7190:1997 e ASTM D143-09 são praticamente idênticos. Contudo, o corpo de prova especificado pela AFNOR B51-012 difere consideravelmente dos outros.

Segundo Szücs (2004), os corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras especificados na NBR 7190:1997 exigem um dispositivo de ensaio especial, devido à geometria deles. Essa geometria provoca o surgimento de um binário, que ocasiona um estado de tensões combinadas de tração normal às fibras, ou compressão normal às fibras, juntamente com o cisalhamento. Segundo Santos Neto et al. (2008), a aplicação da carga nesses corpos de prova gera uma combinação dos esforços. Em pesquisas realizadas em ensaios de cisalhamento utilizando 21 corpos de prova segundo a NBR 7190:1997, o resultado mostrou que 48% do rompimento foi motivado por cisalhamento puro (FUSCO; FERREIRA, 1993).

Observa-se que existem diferenças entre as taxas de carregamento encontradas nas normas pesquisadas. Duas delas especificam uma velocidade de deslocamento; a outra especifica uma taxa de carregamento em termos de taxa de força. A determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é feita usando a força máxima cisalhante aplicada ao corpo de prova, que atua na seção crítica do corpo de prova.

Um ponto importante a destacar é a elaboração dos corpos de prova para as normas NBR 7190:1997 e ASTM D143-09. Na confecção dos corpos de prova de acordo com dessas normas, são necessários conhecimentos relacionados ao uso das máquinas, segurança e precisão, devido principalmente ao tamanho dos mesmos. Por sua vez, na confecção dos corpos de prova propostos por Szücs (1998), a segurança está garantida devido ao tamanho e ao tipo de máquinas para sua elaboração.

**Tabela 9:** Análise das normas técnicas de cisalhamento paralelo às fibras.

Ensaio mecânico	Normas Técnicas		
	NBR 7190:1997	AFNOR B 51-012	ASTM D143-09
Dimensão do corpo de prova	5 cm × 5 cm × 6,4 cm	10 mm × 20 mm × 150 mm	50 mm × 50 mm × 63 mm
Determinação da resistência ao cisalhamento	$f_{v0} = \frac{F_{v0,máx}}{A_{v0}}$	$f_v = \frac{F}{A_v}$	$\tau_\mu = \frac{F_\mu}{A}$
Tamanho da amostra	6 corpos de prova	Não específica	Não específica
Velocidade de aplicação da carga	Carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 2,5 MPa/min	A velocidade de carregamento deve ser tal que produza deslocamento de 0,20 mm/min	A velocidade de carregamento deve ser tal que produza deslocamento de 0,6 mm/min
Corpos de prova			
Corpo de prova propostos por Szücs (2004)			

### 2.10.1.3 Ensaio de embutimento paralelo e perpendicular às fibras

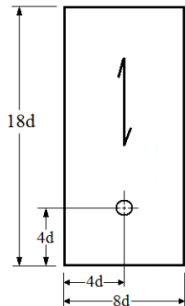
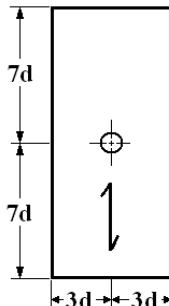
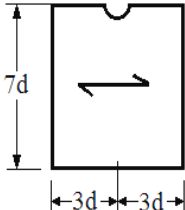
As **Tabelas 10** e **11** apresentam as dimensões dos corpos de prova, o critério para a determinação da resistência, o tamanho das amostras, a taxa de carregamento e os desenhos dos corpos de prova para os ensaios de embutimento paralelo e perpendicular às fibras.

Observa-se que os corpos de prova da norma NBR 7190:1997 e AFNOR EN 383 são similares, porém, suas dimensões divergem. As dimensões dos corpos de prova para as duas normas estão em função do diâmetro do parafuso. O volume de madeira utilizado na elaboração dos corpos de prova de acordo com a NBR 7190:1997 é maior que o volume proposto pela norma AFNOR EN 383 (1993), necessitando de maior quantidade de madeira para a sua confecção. As dimensões dos corpos de prova da AFNOR EN 383 (1993) permitem uma boa manipulação destes durante os ensaios mecânicos.

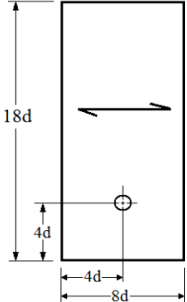
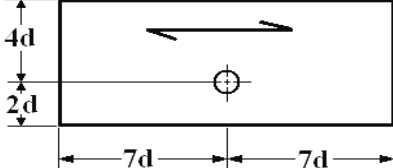
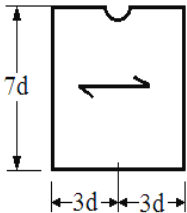
Foi verificado que a taxa de carregamento é diferente para as três normas. Já na determinação da resistência ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras, as normas não apresentam diferença.

Devido à facilidade de confecção dos corpos de prova, e também ao volume de madeira usado por eles, recomenda-se utilizar os corpos de prova especificados na norma AFNOR EN 383 (1993) para a realização dos ensaios de embutimento desta pesquisa.

**Tabela 10:** Análise das normas técnicas de embutimento paralelo às fibras.

Ensaio mecânicos	Normas Técnicas		
	NBR 7190:1997	AFNOR EN 383 (1993)	ASTM D143-09
Dimensão do corpo de prova	8d × 2d × 18d d: diâmetro do parafuso	6d × 2,5d × 14d d: diâmetro do parafuso	7d × 6d d: diâmetro do pino
Determinação da resistência ao embutimento	$f_{e0} = \frac{F_{e0}}{td}$	$f_{e0} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{td}$	$f_{e0} = \frac{F_{e0}}{td}$
Tamanho da amostra	6 corpos de prova	Não especifica	Não especifica
Velocidade de aplicação da carga	Carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min	A velocidade de carregamento deve ser tal que produza deslocamento de 0,40 mm/min	Não especifica
Corpos de prova			

**Tabela 11:** Análise das normas técnicas de embutimento perpendicular às fibras.

Ensaio mecânico	Normas Técnicas		
	NBR 7190:1997	AFNOR EN 383 (1993)	ASTM D143-09
Dimensões do corpo de prova	$8d \times 2d \times 18d$ d: diâmetro do parafuso	$6d \times 2,5 \text{ cm} \times 14d$ d: diâmetro do parafuso	$7d \times 6d$ d: diâmetro do pino
Determinação da resistência ao embutimento	$f_{e90} = \frac{F_{e90}}{td}$	$f_{e90} = \frac{F_{máx}}{td}$	$f_{e90} = \frac{F_{e90}}{td}$
Tamanho da amostra	6 corpos de prova	Não especifica	Não especifica
Velocidade de aplicação da carga	Carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa / min	A velocidade de carregamento deve ser tal que produza deslocamento de 0,40 mm/min	Não especifica
Corpos de prova			

### 2.10.2 Caracterização da madeira a quente

Vários trabalhos foram encontrados na literatura técnica sobre a determinação das propriedades mecânicas a quente (KNUDSON; SCHNIEWIND, 1975; BENGTSSON; BETZOLD, 2000; YOUNG; CLANCY, 2001; MORAES et al., 2005; VAN ZEELAND, 2005; PONCSÁK et al., 2006; McCURDY, 2006; YILDIZ et al., 2007; BEDNAREK, 2009).

A **Tabela 12** apresenta uma síntese das informações encontradas, tais como o intervalo de temperaturas investigado, as taxas e a duração de aquecimento e os dispositivos de aquecimento utilizados pelos vários autores. Observou-se que foram usados, basicamente, dois dispositivos de aquecimento: forno elétrico com controle de temperatura, que tem como vantagem a facilidade de utilização e baixo custo de operação; e equipamentos mais complexos, com tecnologia avançada e de alto custo, como aquecedores por placas metálicas e aquecedores com gases inertes. A vantagem desses tipos de aquecedores é o rápido aquecimento e a exatidão no controle da temperatura.

**Tabela 12:** Aquecimento dos corpos de prova.

Fonte	Aquecimento			
	Intervalo de temperatura (°C)	Taxa (°C/min)	Duração (min)	Tipo aquecimento
Knudson e Schniewind (1975)	de 20 até 280	-----	5 e 20	Placas quentes
Bengtsson e Betzold (2000)	de 95 e 135	-----	360 e 600	Vapor de água
Young e Clancy (2001)	de 20 até 250	-----	90 e 150	Placas quentes
Moraes et al. (2005)	de 20 até 240	-----	120	Forno elétrico
Van Zeeland (2005)	de 20 até 200	-----	45	Placas quentes
Poncsák et al. (2006)	de 20 até 230	-----	30	Gases inertes
McCurdy (2006)	de 20 até 240	-----	45	Vapor de água
Yildiz et al. (2007)	de 130, 150, 180 e 200	-----	120, 360, 600	Forno elétrico
Bednarek (2009)	de 20 até 220	10	30 e 45	Forno elétrico

### 2.10.3 Conclusões preliminares

Foi apresentada uma sucinta análise das normas NBR 7190:1997, ASTM D143-09 e AFNOR, indicando as dimensões dos corpos de prova e procedimentos de ensaios. Dessa análise, foram eleitos os procedimentos e dimensões dos corpos de prova utilizados neste trabalho. Da mesma forma foi apresentada uma síntese de trabalhos, encontrados na literatura especializada, que guardam relação com equipamentos, taxas e tempos de aquecimento. Dessa revisão, foi eleito o dispositivo utilizado no aquecimento dos corpos de prova.

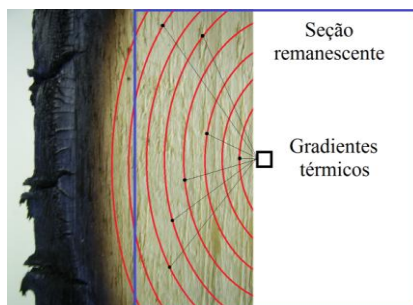
### 2.11 CRITÉRIOS DE NORMA PARA A DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE CÁLCULO DA MADEIRA

Durante o período de uso de uma estrutura, existe a probabilidade de ocorrência simultânea de vários tipos de carregamento, dependendo das diferentes formas de combinação dessas ações. Podem ocorrer os seguintes tipos de carregamento: normal, especial e excepcional. Esses podem ser de longa duração ou transitórios, conforme seu tempo de duração. Os casos mais desfavoráveis serão denominados como carregamento de projeto (FUSCO et al., 1996).

No dimensionamento de qualquer elemento estrutural, é necessário que a sua resistência seja maior do que esforços solicitantes atuantes durante toda sua vida útil. No entanto, durante as análises, surgem incertezas ligadas à resistência ou ao carregamento. Assim, sempre irá existir uma probabilidade de ruína associada a um elemento ou à estrutura como um todo. Desse modo, a confiabilidade de uma estrutura ou elemento pode ser avaliada quanto à probabilidade de falha ou quanto à probabilidade de sobrevivência. Para garantir que a falha não ocorra, é preciso utilizar coeficientes de segurança que em geral, são menores do que 1, e são multiplicados pelo valor característico da propriedade, obtendo-se o valor de resistência de cálculo para o material. Como os valores são determinados com base na estatística, os coeficientes de segurança dependem de sua natureza, sendo pequenos para carga de pouca dispersão, e grandes, para cargas de muita dispersão. Esse procedimento de dimensionamento básico é denominado “estados limites últimos” (FUSCO et al., 1996).

Para atingir tais níveis de segurança, é necessário adotar coeficientes de segurança no projeto que permitam que a construção seja mais segura para as pessoas. Esses coeficientes devem considerar o efeito da temperatura em situação normal e em situação de incêndio. Neste trabalho, define-se situação normal de projeto a temperaturas entre 20 °C e 70 °C, e situação de pré-incêndio e de incêndio, temperaturas que extrapolem a 70 °C.

Quando a madeira é submetida a uma situação de incêndio, irá queimar. Tanto a madeira quanto o carvão oriundo da combustão desse material são isolantes térmicos e retardam o fluxo de calor para o interior da secção. Isso faz com que a velocidade da degradação térmica diminua, retardando o avanço da frente de carbonização. Em elemento estrutural, o centro da secção remanescente apresenta camadas com diferentes níveis de temperatura (gradientes térmicos). Na secção remanescente, as propriedades térmicas e mecânicas também são diferentes, o que ocasiona a diminuição da resistência e da rigidez da camada aquecida (**Figura 28**).



**Figura 28:** Gradientes de térmicos.

Na secção remanescente do elemento estrutural, é possível usar os coeficientes de modificação para estimar as propriedades mecânicas da madeira em função da temperatura e assim modelar o comportamento da madeira a altas temperaturas, utilizando ferramentas de métodos numéricos ou a modelagem por elementos finitos.

As normas técnicas de construções em madeira apresentam os critérios de dimensionamento de estruturas em situação normal e em situação de incêndio. A norma americana NDS (2005) e a norma chilena NCh 1198 (2006) apresentam coeficientes de modificação em situação normal de projeto. Já a norma europeia EN 1995 1-2 (2005) apresenta



condições gerais de projeto em situação normal e em situação de incêndio. As três normas serão descritas na sequência.

### 2.11.1 Norma americana NDS (2005)

A norma americana Especificação de Projeto para Construção em Madeira (NDS 2005) apresenta procedimentos para projeto de estrutura, e o Fator de Projeto de Resistência e Carga (LRFD) apresenta os diferentes fatores de ajuste para valores de projeto para madeira maciça, madeira laminada colada e placas de madeira em geral. A norma americana considera valores de resistência admissíveis, que são obtidos por meio dos ensaios mecânicos de flexão, tração, cisalhamento, compressão paralela e perpendicular às fibras e módulo de elasticidade.

Os valores admissíveis são afetados por fatores de ajuste e coeficientes de modificação que são utilizados numa situação de projeto. Eles são cumulativos, ou seja, um elemento estrutural pode ser afetado por vários coeficientes de modificação. Os fatores de ajuste e coeficientes de modificação consideram a duração da carga, o teor de umidade da madeira, a temperatura, a estabilidade da viga, o tamanho, a utilização horizontal (flexão), a estabilidade de coluna, a instabilidade lateral e a rigidez, a relação de área, de conversão de forma, de resistência e efeito de tempo e o tipo de tratamento retardante ao fogo dado à madeira.

A norma americana NDS, para considerar o efeito prolongado de temperaturas nas propriedades mecânicas da madeira, entre 38 °C e 70 °C, faz referência a um coeficiente de modificação por efeito da temperatura ( $C_t$ ). Este coeficiente é usado para a determinação da resistência de cálculo de madeiras de todo tipo de construções, sejam elas industriais ou residenciais, em que os membros estruturais estão próximos ou em contato com líquidos aquecidos utilizados no processo produtivo, ou sofrem aquecimento por temperaturas ambientais ocasionadas por radiação solar.

O coeficiente de modificação também é utilizado em um projeto de madeira quando as estruturas são submetidas a cargas permanentes ou suportam equipamentos pesados. Quando as temperaturas ambientais são inferiores aos valores médios da estação do ano, utilizam-se coeficientes de modificação que aumentam os valores de projeto. Isso ocorre em estruturas expostas a temperatura abaixo de 0 °C por vários meses do ano.

Os valores deste fator de modificação das propriedades mecânicas da madeira por efeito da temperatura são apresentados na **Tabela 13**.

**Tabela 13:** Fator de modificação por faixa de temperatura da NDS (2005).

Propriedade	Condições de uso (%)	Temperatura (°C)		
		$\theta \leq 38$	$38 < \theta \leq 52$	$52 < \theta \leq 70$
Módulo de elasticidade (MOE)	Seco (12%)	1,0	0,9	0,9
	Verde	1,0	0,9	0,9
Outras propriedades e ligações	Seco (12%)	1,0	0,8	0,7
	Verde	1,0	0,7	0,5

A norma americana NDS considera efeitos reversíveis e efeitos permanentes dependendo do nível de temperatura alcançado pela estrutura ou membro da estrutura.

Para determinar os valores de cálculo das propriedades da madeira para projeto de acordo com a NDS é dada pela Equação 1.

$$f'_d = \left( \prod_{i=1}^n C_n \right) \cdot f_d, \quad (1)$$

onde:

$f'_d$  : fator ajustado em função dos parâmetros da **Tabela 14**;

$C_n$  : representa os fatores de redução prescritos pela NDS e LRFD, em função da propriedade a ser calculada. Esses fatores são apresentados na **Tabela 14**;

$f_d$  : propriedade mecânica ajustada definida pelo produto de diversos fatores de redução ( $C_n$ ).

Para determinar os valores de cálculo das propriedades da madeira para projeto de acordo a LRFD é dada pela Equação 2.

$$f'_d = f_d \cdot \left( \prod_{i=1}^n C_n \right) \cdot K_F \cdot \phi \cdot \lambda, \quad (2)$$

onde:

$K_F$  : fator de conversão de forma;

$\phi$  : fator de resistência;

$\lambda$  : fator de efeito de tempo.

A **Tabela 14** apresenta os valores de referência de projeto. Para a obtenção destes, multiplicar os valores de referência pelos fatores de ajustes para uma das propriedades.

**Tabela 14:** Valores de referência e ajuste para projeto.

Propriedade		NDS	NSD e LRFD										LRFD		
		Fator de duração da carga	Fator de serviço madeira úmida	Fator de temperatura	Fator de estabilidade de viga	Fator de tamanho	Fator de utilização horizontal	Fator de incisão	Fator membros repetitivos	Fator de estabilidade da coluna	Fator de instabilidade lateral e rigidez	Fator de relação de área	Fator de conversão de forma	Fator de resistência	Fator de efeito de tempo
$f'_b = f_b$	×	$C_D$	$C_M$	$C_t$	$C_L$	$C_F$	$C_{fu}$	$C_i$	$C_r$	-	-	-	$K_F$	$\phi_b$	$\lambda$
$f'_t = f_t$	×	$C_D$	$C_M$	$C_t$	-	$C_F$	-	$C_i$	-	-	-	-	$K_F$	$\phi_t$	$\lambda$
$f'_v = f_v$	×	$C_D$	$C_M$	$C_t$	-	-	-	$C_i$	-	-	-	-	$K_F$	$\phi_v$	$\lambda$
$f'_{c\perp} = f_{c\perp}$	×	-	$C_M$	$C_t$	-	-	-	$C_i$	-	-	-	$C_b$	$K_F$	$\phi_c$	$\lambda$
$f'_c = f_c$	×	$C_D$	$C_M$	$C_t$	-	$C_F$	-	$C_i$	-	$C_p$	-	-	$K_F$	$\phi_c$	$\lambda$
$E' = E$	×	-	$C_M$	$C_t$	-	-	-	$C_i$	-	-	-	-	-	-	-
$E'_{min} = E_{min}$	×	-	$C_M$	$C_t$	-	-	-	$C_i$	-	-	$C_T$	-	$K_F$	$\phi_s$	-

**Fonte:** NDS (2005).

onde:

$f'_b = f_b$  : resistência à flexão ajustado e de referência;

$f'_t = f_t$  : resistência à tração paralela às fibras ajustado e de referência;

$f'_v = f_v$  : resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ajustada e de referência;

$f'_{c\perp} = f_{c\perp}$  : resistência à compressão perpendicular às fibras ajustada e de referência;

$f'_c = f_c$  : resistência à compressão paralela às fibras ajustada e de referência;

$E' = E$  : módulo de elasticidade ajustado e de referência;

$E'_{min} = E_{min}$  : módulo de elasticidade ajustado e de referência para a estabilidade de vigas e colunas.

## 2.11.2 Norma Chilena NCh 1198 (2006)

A norma chilena NCh 1198 (2006) define os procedimentos e métodos de projeto estrutural e determina as condições mínimas a serem cumpridas pelos elementos estruturais, construções em madeira, madeira laminada colada, ligações em madeira e postes de madeira. A norma chilena faz referência à utilização de coeficientes de modificação que afetam as tensões admissíveis e o módulo de elasticidade.

Os coeficientes de modificação utilizados são relativos à qualidade da madeira, à sua espécie, ao teor de umidade, à duração da carga, ao trabalho em conjunto com flexão, à temperatura e ao tratamento químico dado à madeira. A norma contém algumas diferenças entre os fatores de modificação quando o projeto é executado em madeiras coníferas (*Pinus radiata*) ou em folhosas.

Os fatores de modificação devem considerar os efeitos da temperatura sobre a resistência mecânica da madeira, quando os elementos estruturais sejam ocasionalmente expostos a altas temperaturas, sejam elas ocasionadas pela ação do fogo ou não. Os valores das propriedades mecânicas admissíveis são modificados pelos diferentes fatores de redução. No entanto, para tais condições, a umidade relativa é geralmente baixa, o que determina que o teor de umidade da madeira também seja baixo. Os efeitos imediatos dessas exposições regulares a temperaturas elevadas são menos pronunciados devido ao teor de umidade baixo. Independentemente das mudanças de temperatura, as propriedades mecânicas da madeira geralmente aumentam com a diminuição da umidade. Com relação à neutralização mútua desses efeitos, é aceito que os valores estabelecidos nesta norma aplicam-se a madeiras submetidas a temperaturas não superiores a 50 °C e aquecimentos ocasionais de curta duração, a temperaturas superiores a 70 °C. A norma NCh 1198 (2006) também considera coeficientes de modificação quando algum elemento, ou a estrutura toda, é submetida a baixa temperatura, com alto teor de umidade.

Os coeficientes de modificação apresentados pela norma chilena que levam em conta a temperatura são utilizados como referência para determinar os valores de projeto. Eles aumentam ou diminuem os valores de resistência para cada 1 °C de aumento ou diminuição da temperatura, de acordo com a **Tabela 15**.

**Tabela 15:** Aumento e diminuição dos valores de resistência para cada 1 °C de aumento ou diminuição de temperatura da madeira.

Propriedades	Teor de umidade (%)	Aumento da resistência por resfriamento da madeira abaixo de 20 °C (não menor que -180 °C)	Diminuição da resistência por aquecimento da madeira acima de 20 °C (não maior que 70 °C)
Módulo de elasticidade	0	+0,0007	-0,0007
	12	+0,0027	-0,0038
Outras propriedades	0	+0,0031	-0,0031
	12	+0,0058	-0,0088

A partir da **Tabela 14** forma obtidos os coeficientes de modificação para cada nível de temperatura, que são apresentados na **Tabela 16**.

**Tabela 16:** Coeficientes de modificação da NCh 1198 (2006).

Temperatura (°C)	Coefficiente de modificação
20	1,00
40	0,82
50	0,74
60	0,65
70	0,56

Os valores de projeto são determinados, para cada propriedade, ao multiplicar as tensões admissíveis pelo coeficiente de modificação, dependendo das condições de serviço do elemento estrutural. A resistência de cálculo de projeto será determinada pela Equação 3.

$$f_{dis} = f_{adm} \cdot (k_H \cdot k_D \cdot k_\theta \cdot k_C \cdot k_r \cdot k_\lambda \cdot k_h), \quad (3)$$

onde:

$f_{dis}$  : resistência de cálculo de projeto;

$f_{adm}$  : tensões admissíveis da propriedade da madeira;

$k_H$  : coeficiente de modificação devido à umidade;

$k_D$  : coeficiente de modificação devido à duração da carga;

$k_\theta$  : coeficiente de modificação devido à temperatura (**Tabela 16**);

$k_C$  : coeficiente de modificação devido ao trabalho em conjunto;

$k_r$  : coeficiente de modificação devido à redução da área;

$k_\lambda$  : coeficiente de modificação devido ao tombamento;

$k_h$  : coeficiente de modificação devido à altura;

### 2.11.3 Norma NBR 7190:1997

A norma NBR 7190:1997 de dimensionamento de estruturas de madeira baseia-se no método de estados limite de utilização. O método de estados limite é um método semiprobabilístico que estabelece as condições gerais que devem ser seguidas no projeto, na execução e no controle das estruturas correntes de madeira, tais como pontes, pontilhões, coberturas, pisos e cimbres.

Nessa norma são definidos estados limites, que podem ser: os estados limite últimos e os estados limites de serviço. Os estados limites últimos são caracterizados como: perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como um corpo rígido; ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais; transformação da estrutura, no todo ou em parte, em um sistema isostático; instabilidade por deformação; instabilidade dinâmica. Os estados limites de serviços no período de vida da estrutura são caracterizados como: danos ligeiros ou localizados que comprometam o aspecto estético da construção ou a durabilidade da estrutura; deformações excessivas que afetem a utilização normal da construção ou seu aspecto estético; vibrações excessivas ou desconfortáveis.

A NBR 7190:1997 define classes de resistência para possibilitar o emprego de madeiras com propriedades padronizadas. A norma estabelece que o projeto das estruturas de madeiras deva ser feito considerando o teor de umidade de equilíbrio da madeira do local onde será implantada a obra. Para tais efeitos, foram definidas as classes de umidade. A norma também considera os efeitos da duração do carregamento e da qualidade do material.

A qualidade da madeira é definida como de primeira ou de segunda categoria. A norma especifica coeficientes de modificação por categoria. As madeiras de primeira categoria são isentas de defeitos e classificadas por meio de método visual normalizado, e são também submetidas a uma classificação mecânica. Para as madeiras de segunda categoria, no caso particular, as madeiras serradas, assim como para coníferas, admite-se um valor particular, que leva em conta o risco da presença de nós, que não são detectáveis pela inspeção visual.

Adicionalmente, a norma incorpora um coeficiente de ponderação de segurança do material ( $\gamma_w$ ). É o coeficiente de minoração das resistências, resultantes do produto de  $\gamma_{w1} \times \gamma_{w2} \times \gamma_{w3}$ , que considera a variabilidade intrínseca da madeira do lote considerado as usuais diferenças anatômicas aleatórias existentes entre as madeiras

empregadas na fabricação dos corpos de prova e da estrutura, além de outras reduções das resistências efetivas em relação às resistências teóricas consideradas no projeto, respectivamente.

Os coeficientes de ponderação nos estados limite, de acordo com a utilização, são dados por:

$\gamma_{wc} = 1,4$  para tensões de compressão paralela às fibras;

$\gamma_{wt} = 1,8$  para tensões de tração paralela às fibras;

$\gamma_{wv} = 1,8$  para tensões de cisalhamento paralelo às fibras.

O valor de cálculo  $f_{wd}$  de uma propriedade da madeira é determinado pela Equação 4.

$$f_{wd} = k_{mod} \cdot \frac{f_{wk}}{\gamma_w}, \quad (4)$$

onde:

$f_{wk}$  : é o valor característico da resistência;

$k_{mod}$  : coeficiente de modificação que leva em consideração os efeitos da duração do carregamento, da umidade do meio ambiente e da qualidade do material;

$\gamma_w$ : coeficiente de ponderação de segurança que leva em conta o material.

O coeficiente de modificação  $k_{mod}$  é o resultado do produto de vários coeficientes parciais de modificação, é dado pela Equação 5.

$$k_{mod} = k_{mod\ 1} \cdot k_{mod\ 2} \cdot k_{mod\ 3}, \quad (5)$$

onde:

$k_{mod\ 1}$ ,  $k_{mod\ 2}$  e  $k_{mod\ 3}$ . O  $k_{mod\ 1}$  consideram a classe de carregamento e o tipo de material empregado; o  $k_{mod\ 2}$ , a classe de umidade e o tipo de material empregado e, finalmente, o  $k_{mod\ 3}$  considera a categoria da madeira: se é classificada ou não.

De acordo com a visão geral apresentada na norma NBR 7190:1997, com relação à determinação dos valores de cálculo das resistências, observou-se que seria necessário introduzir na norma brasileira um coeficiente de modificação nas propriedades da madeira que se considere a influência da temperatura ( $k_{mod,\theta}$ ).

Em algumas cidades de países tropicais como é o caso do Brasil, as temperaturas podem atingir valores médios de 40 °C, devido à

radiação solar. Esses níveis de temperatura podem afetar as estruturas de madeira que suportam o telhado, onde a temperatura pode alcançar valores superiores a 55 °C, dependendo da eficiência térmica do telhado. Segundo Lamberts (1988), o teto é o componente do edifício mais exposto ao clima externo, é pode atingir temperaturas maiores do que 60 °C.

#### 2.11.4 Norma europeia EN 1995 1-2 (2005)

As normas EN 1995 1-1 e EN 1995 1-2 (2005) apresentam as condições gerais que devem ser seguidas nos projetos de estruturas em madeiras. A Norma EN 1995 1-1 (2005) apresenta as condições de projeto à temperatura ambiente, enquanto que a norma EN 1995 1-2 (2005) apresenta as condições de projeto para estruturas de madeira em situação de incêndio.

A EN 1995 1-2 (2005) considera o incêndio padrão para gerar as ações térmicas, e utiliza abordagem baseada em desempenho da engenharia de segurança, para se referir às ações térmicas baseadas em parâmetros físico-químicos. As duas abordagens traduzem-se em dois níveis de verificação: um, baseado em modelos simplificados de cálculo e o outro, em modelos avançados de cálculo.

Os modelos simplificados são aplicados a elementos estruturais isolados, enquanto os modelos avançados podem ser aplicados à estrutura global, a parte da estrutura ou a elementos isolados. Em geral, a norma especifica que as exigências básicas são determinadas a partir da função dos elementos construtivos na edificação e visam garantir as exigências de resistência mecânica e compartimentação do incêndio nos locais onde isso é exigido.

No que concerne à compartimentação, os elementos formadores dos contornos de um compartimento, incluindo as ligações, devem ser projetados e construídos de tal modo que a sua função separadora seja mantida durante certo tempo de exposição ao fogo, assegurando a integridade e a capacidade de isolamento do elemento e a limitação da radiação térmica para os lados não expostos ao fogo.

Por sua vez, os elementos que apresentam somente função portante devem atender aos critérios de resistência mecânica. Os elementos que apresentam função separadora e portante devem atender aos critérios de resistência mecânica, integridade e isolamento.

Assim como a norma NBR 7190:1997, a norma EN 1995 1-1 (2005) especifica que se deve efetuar a combinação das ações para a



verificação dos estados limites últimos e para os estados limites de serviço. As combinações das ações para os estados limites últimos devem ser efetuadas para as situações de projeto: duráveis, transitórias, acidentais e sísmicas. A combinação para as situações duráveis e transitórias são especificadas através de equações.

Os valores de cálculo das propriedades da madeira a temperatura ambiente são dados pela Equação 6.

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_M}, \quad (6)$$

onde:

$X_d$  : valor de cálculo de uma propriedade;

$k_{mod}$  : coeficiente de modificação que leva em conta a duração da carga e teor de umidade;

$X_k$  : resistência característica da propriedade;

$\gamma_M$ : fator de segurança.

O cálculo das propriedades da madeira em situação de incêndio é feito pela Equação 7.

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (7)$$

onde:

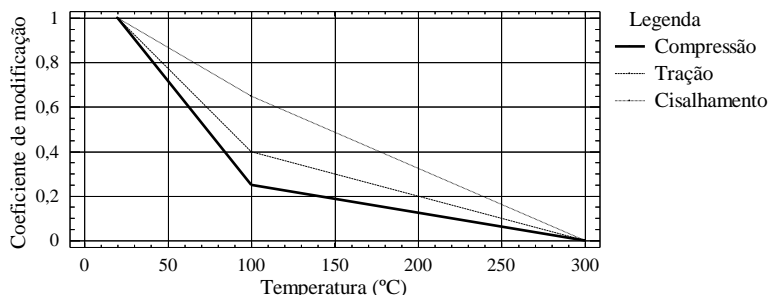
$f_{d,fi}$  : força de desenho em situação de incêndio;

$K_{mod,fi}$  : coeficiente de modificação em situação de incêndio (**Figura 29**);

$f_{20}$  : quantil de 20% de resistência da propriedade à temperatura ambiente;

$\gamma_{M,fi}$ : fator de segurança parcial da madeira em situação de incêndio.

A **Figura 29** apresenta os coeficientes de modificação das propriedades mecânicas de compressão, de tração e de cisalhamento paralelo às fibras, apresentados pela norma Europeia (EN 1995 1-2). Observou-se que a propriedade de compressão paralela às fibras apresenta o menor coeficiente de redução das três propriedades.



**Figura 29:** Coeficientes de modificação do EN 1995 1-2.

### 2.11.5 Conclusões parciais

Analisando os critérios de projeto utilizados por diversas normas para o dimensionamento de estruturas em madeiras, observou-se que as normas americana NDS (2005) e chilena NCh 1198 (2006) consideram o efeito da temperatura na determinação da resistência mecânica da madeira, apresentando um coeficiente de modificação. Por sua vez, a norma NBR 7190:1997 (em revisão em 2012) considera um método simplificado de dimensionamento de elementos ou estruturas de madeira em situação de incêndio. Já a norma EN 1995 1-2 (2005) apresenta modelos simplificados e modelos avançados de cálculo. Os modelos simplificados são aplicados a elementos estruturais isolados, enquanto os modelos avançados podem ser aplicados à estrutura global.

Considerando que algumas estruturas de madeira, ou membros destas, podem ser atingidas por temperaturas superiores à temperatura ambiente, sejam elas originárias de incêndio ou não, é necessário considerar um coeficiente de modificação para as propriedades mecânicas da madeira. O coeficiente de modificação deve afetar diretamente o valor característico da madeira, podendo variar de acordo com a propriedade e a espécie de madeira utilizada na estrutura.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e os métodos empregados no desenvolvimento desta pesquisa. Embora a norma NBR 7190:1997 apresente detalhadamente a metodologia, o procedimento e as dimensões dos corpos de prova, em todos os ensaios de caracterização mecânica da madeira, as dimensões dos corpos de prova de flexão estática, cisalhamento e embutimento paralelo e embutimento perpendicular às fibras são incompatíveis com os equipamentos disponíveis no Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para a realização dos ensaios a temperaturas elevadas. A câmara térmica usada nos ensaios a quente tem dimensões reduzidas, o que impede o uso de corpos de prova com dimensões maiores, recomendadas pela norma NBR 7190:1997. Outro fator importante a considerar é a qualidade da madeira para a fabricação dos corpos de prova. Obter madeira da espécie *Pinus taeda* livre de defeitos dificulta ainda mais elaborar corpos de prova de dimensões maiores.

Foram realizados ensaios de caracterização mecânica das espécies *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, sob várias condições de temperatura, e, a partir deles, foram determinados os fatores de redução das propriedades mecânicas em função da temperatura. Todas as amostras foram ensaiadas em níveis de temperatura situados entre 20 °C e 230 °C. Nesta análise, foram incorporados os resultados obtidos na dissertação de mestrado de Manríquez (2008) para a espécie *Schizolobium amazonicum*.

#### 3.1 AMOSTRAS E CORPOS DE PROVA

Para a caracterização das madeiras foram realizados ensaios mecânicos em 15 níveis de temperatura, com 10 corpos de prova para cada nível, conforme especificado na **Tabela 17**.

A quantidade de corpos de prova para cada nível de temperatura foi determinada a partir de dados experimentais do paricá (*Schizolobium amazonicum*) oriundos do trabalho de Manríquez (2008), com a finalidade de apresentar 95% de confiança para os resultados obtidos.

As amostras eram provenientes de madeira com classificação visual conforme norma NBR 7190:1997, Anexo G. Os corpos de prova

eram isentos de defeitos e retirados de regiões afastadas das extremidades das peças, de pelo menos cinco vezes a menor dimensão da secção transversal da peça considerada, porém nunca menor que 30 cm.

**Tabela 17:** Quantidade de corpos de prova por nível de temperatura.

Ensaio	Nível de temperatura °C															
	20	40	50	60	70	80	90	100	110	130	150	170	190	210	230	Sub total
Compressão	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	150
Flexão	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	150
Cisalhamento	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	150
Embutimento	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	300
Totais corpos de prova																750

Os corpos de prova foram associados de maneira a garantir grupos com massa específica estatisticamente homogênea. A homogeneidade foi verificada pela análise de variância, usando o intervalo da menor diferença significativa (LSD) para confiabilidade de 95% (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

3.2 AQUECIMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Os ensaios de resistência mecânica a quente foram realizados com corpos de prova cuja temperatura no interior estava homogênea. Em relação aos equipamentos do laboratório para o aquecimento dos corpos de prova, foi utilizado um forno elétrico da marca Quimis, com dimensões internas de 90 cm × 100 cm × 66 cm e controle automático de temperatura, com precisão de ± 1 °C (**Figura 30**). A fim de obter medidas adicionais de temperatura, foram instalados termopares no interior do equipamento.



**Figura 30:** Forno de aquecimento dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram introduzidos no forno aquecido à temperatura de ensaio, lá permanecendo durante 150 min ou 210 min, de acordo com o tamanho do corpo de prova, conforme especificado na (Tabela 18). O tempo de aquecimento foi determinado a partir de ensaios preliminares, a fim de garantir a homogeneidade da temperatura no interior dos corpos de prova. A introdução de cada corpo de prova no forno foi efetuada com defasagem entre 8 min e 10 min tempo estimados de duração do ensaio, de modo a garantir o mesmo tempo de exposição ao calor a cada um deles (Apêndice 5).

**Tabela 18:** Tempo de aquecimento dos corpos de prova.

Ensaio mecânico	Tempo de aquecimento (min)
Compressão paralela às fibras	210
Flexão estática	150
Cisalhamento paralelo às fibras	210
Embutimento paralelo e perpendicular às fibras	150

### 3.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos foram realizados no interior de uma câmara térmica, de dimensões internas de 37 cm × 50 cm × 52 cm, com precisão de  $\pm 1$  °C, acoplada a uma máquina universal de ensaios de marca Kratos, com uma célula de carga de 200 kN, com precisão de  $\pm 2$  kN (Figura 31).



**Figura 31:** Câmara térmica.

Durante todo o ensaio, os valores de força aplicada e de deslocamento foram registrados pelo sistema computacional de controle

da máquina, para análise posterior dos resultados. O tempo de duração dos ensaios situou-se entre 8 min e 10 min. Para o melhor ajuste dos corpos de prova na máquina de ensaio, utilizou-se uma rótula entre o atuador e o corpo de prova de compressão, de embutimento paralelo e perpendicular às fibras.

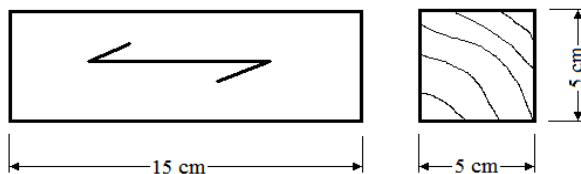
### 3.3.1 Ensaios de compressão paralela às fibras

Os ensaios de resistência à compressão paralela às fibras foram realizados com amostras de *Pinus taeda* e de *Eucalyptus saligna*, com teor de umidade de 12% e massa específica média de 423 kg/m<sup>3</sup> e 745 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, para as duas amostras. Cada amostra era composta por 150 corpos de prova distribuídos em 15 grupos com 10 corpos de prova (**Tabela 19**).

**Tabela 19:** Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de compressão paralela às fibras à temperatura ambiente.

Temperatura de ensaio (°C)	<i>Pinus taeda</i>		<i>Eucalyptus saligna</i>	
	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )
20	420	30	753	67
40	427	30	740	69
50	419	30	742	69
60	428	30	752	67
70	418	30	750	67
80	419	30	754	67
90	425	30	751	67
100	421	30	748	67
110	421	30	736	70
130	423	30	749	67
150	422	30	737	70
170	426	30	747	67
190	425	31	741	68
210	424	31	738	69
230	426	31	739	69

Para os ensaios de compressão paralela às fibras, serão utilizados corpos de prova apresentados pela norma brasileira NBR 7190:1997, por apresentarem um procedimento de ensaio detalhado e as dimensões dos corpos de prova compatíveis com os equipamentos disponíveis no laboratório (**Figura 32**).



**Figura 32:** Corpos de prova de compressão paralela às fibras.

Nos ensaios mecânicos de resistência à compressão paralela às fibras, utilizou-se a metodologia descrita na norma NBR 7190:1997, porém sem o uso de tradutores de deslocamento, que poderiam ser danificados pela alta temperatura. O deslocamento da travessa foi aplicado com uma velocidade aproximada de 1,8 mm/min (**Figura 33**).



**Figura 33:** Dispositivo de ensaio à compressão paralela às fibras.

A resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c0,\theta}$ ) foi determinada a partir da máxima força de compressão ( $F_{c0,máx}$ ) obtida nos diferentes níveis de temperaturas, conforme a Equação 8.

$$f_{c0,\theta} = \frac{F_{c0,máx}}{A}, \quad (8)$$

onde:

$F_{c0,máx}$ : máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em N, para um nível de temperatura  $\theta$  (**Figura 34**);

$A$ : área de secção transversal do corpo de prova no trecho comprimido, depois do aquecimento, em mm<sup>2</sup>.

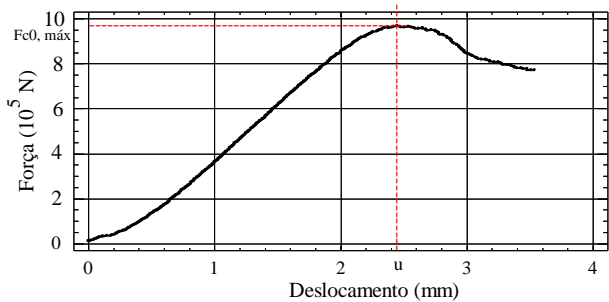


Figura 34: Diagrama força × deslocamento.

3.3.2 Ensaio de flexão estática

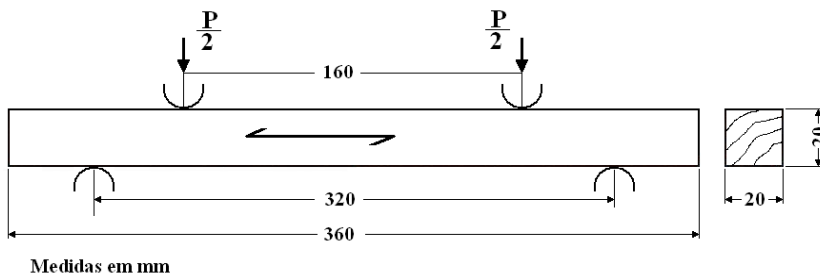
Os ensaios de resistência à flexão estática foram realizados com amostras de *Pinus taeda* e de *Eucalyptus saligna* com massa específica média de 427 kg/m<sup>3</sup> e 774 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, e teor de umidade de 12% para as duas amostras. As amostras eram compostas por 150 corpos de prova distribuídos em 15 grupos, cada grupo constituído por 10 corpos de prova, conforme o especificado na **Tabela 20**.

**Tabela 20:** Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de flexão estática à temperatura ambiente.

Temperatura de ensaio (°C)	<i>Pinus taeda</i>		<i>Eucalyptus saligna</i>	
	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )
20	434	46	776	25
40	421	42	788	25
50	428	45	772	24
60	427	45	771	23
70	431	45	775	22
80	422	42	776	25
90	424	44	774	24
100	433	45	770	25
110	423	44	774	24
130	432	45	769	22
150	424	44	778	22
170	430	45	772	24
190	426	45	777	25
210	430	45	773	25
230	427	45	771	23



Nesta pesquisa, devido principalmente às dimensões da câmara térmica e consumo de matéria prima, foram adotadas as dimensões dos corpos de prova de flexão estática propostos pelas normas AFNOR B 51-008 (1987) e AFNOR B 51-016 (1987), por possuírem as dimensões condscendentes com os equipamentos disponíveis no laboratório que são ilustradas na **Figura 35**.



**Figura 35:** Corpo de prova de flexão estática.

Para os ensaios de resistência à flexão estática, foi utilizada a metodologia descrita na norma AFNOR B 51-008 (1987), cujo esquema de aplicação da carga está ilustrado na **Figura 36**. O deslocamento da travessa foi aplicado a uma velocidade de 2,0 mm/min.



**Figura 36:** Dispositivo de flexão estática.

A resistência à ruptura ao momento na flexão estática ( $f_{FH}$ ) foi determinada a partir da máxima força à flexão ( $P$ ), no instante da ruptura (**Figura 37**), para diferentes níveis de temperatura dos corpos de prova, conforme a Equação 9.

$$f_{FH} = \frac{3P(l-a)}{2bh^2}, \quad (9)$$

onde:

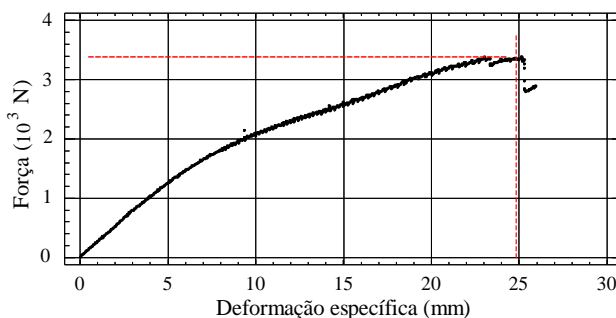
$P$ : máxima carga de flexão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em N, para um nível de temperatura  $\theta$ ;

$l$ : distância entre eixos dos apoios cilíndricos articulados, em mm;

$a$ : distância entre os eixos das cabeças de carregamento, em mm;

$b$ : largura do corpo de prova, em mm;

$h$ : altura do corpo de prova, em mm.

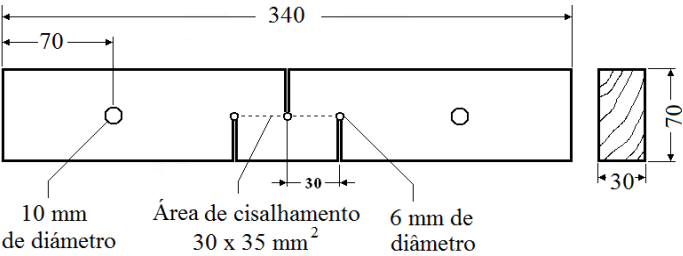


**Figura 37:** Diagrama força  $\times$  deformação específica.

### 3.3.3 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

Os ensaios de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras foram realizados com amostras de *Pinus taeda* e do *Eucalytus saligna*, com teor de umidade de 12% e massa específica média de  $440 \text{ kg/m}^3$  e  $775 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente. Cada amostra era composta por 150 corpos de prova, distribuídos em 15 grupos, com 10 corpos de prova cada um.

Nesta pesquisa, foram utilizados os corpos de prova propostos por Szücs (2004), cujas dimensões são ilustradas na **Figura 38**, devidos principalmente aos resultados experimentais obtidos com os corpos de prova propostos por Szücs (2004) e às pesquisas realizadas por Fusco e Ferreira (1993); Santos Neto et al. (2008), que foram considerados satisfatórios, já que a ruptura ocorre nitidamente por cisalhamento puro.



**Figura 38:** Corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras.

A **Tabela 21** apresenta os valores médios de massa específica dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras.

**Tabela 21:** Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras à temperatura ambiente.

Temperatura de ensaio (°C)	<i>Pinus taeda</i>		<i>Eucalyptus saligna</i>	
	Massa específica (kg/m³)	Desvio padrão (kg/m³)	Massa específica (kg/m³)	Desvio padrão (kg/m³)
20	434	41	780	66
40	445	41	787	65
50	445	39	775	68
60	436	39	785	65
70	434	40	784	65
80	438	39	772	68
90	441	40	782	66
100	446	42	769	68
110	447	40	767	68
130	443	40	771	68
150	440	40	774	68
170	437	39	778	67
190	442	40	765	68
210	434	38	777	67
230	444	41	766	68

Os ensaios de cisalhamento paralelo às fibras foram realizados com o dispositivo ilustrado pela **Figura 39**. No ensaio de cisalhamento, foi utilizada a metodologia descrita na norma francesa AFNOR (1942) e modificada por Szücs (2004). O deslocamento da travessa foi aplicado com uma velocidade de 1,8 mm/min.



**Figura 39:** Dispositivo de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.

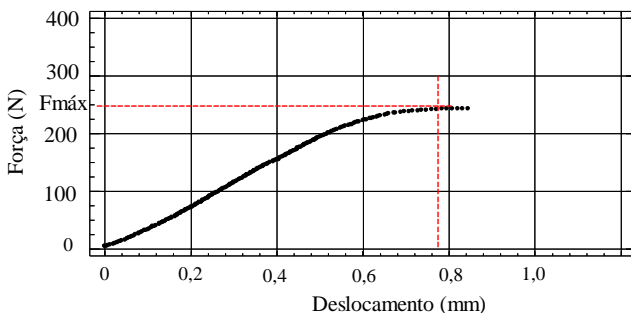
A resistência ao cisalhamento para uma temperatura  $\theta$  ( $f_{v0,\theta}$ ) foi determinada a partir da máxima força de cisalhamento ( $F_{v0,máx}$ ) obtida a partir de ensaios de cisalhamento para diferentes níveis de temperatura, conforme a Equação 10.

$$f_{v0,\theta} = \frac{F_{v0,máx}}{A_{v0}}, \quad (10)$$

onde:

$F_{v0,máx}$ : máxima força de cisalhamento aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em N, para a temperatura  $\theta$  (**Figura 40**);

$A_{v0}$ : área final de seção transversal do corpo de prova no trecho central após o aquecimento em  $\text{mm}^2$ .



**Figura 40:** Diagrama de força  $\times$  deslocamento.

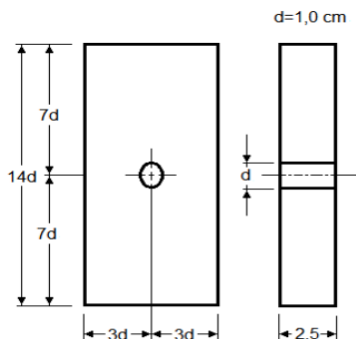
### 3.3.4 Ensaio de embutimento paralelo às fibras

Os ensaios de resistência ao embutimento paralelo às fibras foram realizados em amostras de *Pinus taeda* e de *Eucalyptus saligna*, com teor de umidade de 12% e massa específica média de 430 kg/m<sup>3</sup> e 801 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Cada amostra era composta por 150 corpos de prova distribuídos em 15 grupos com 10 corpos de prova cada um (**Tabela 22**).

**Tabela 22:** Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de embutimento paralelo às fibras à temperatura ambiente.

Temperatura de ensaio (°C)	<i>Pinus taeda</i>		<i>Eucalyptus saligna</i>	
	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio padrão (kg/m <sup>3</sup> )
20	429	27	799	46
40	428	28	808	47
50	425	30	803	46
60	435	29	794	44
70	433	29	806	48
80	432	29	797	45
90	433	29	799	46
100	430	29	798	46
110	434	29	803	46
130	431	29	806	48
150	428	28	804	47
170	430	28	795	44
190	431	29	802	46
210	429	28	800	46
230	426	28	793	44

Os corpos de prova para o ensaio da resistência ao embutimento paralelo às fibras foram confeccionados de acordo a norma AFNOR EN 383 (1993), devido ao menor volume de madeira utilizado na sua elaboração e à boa manipulação desses corpos durante os ensaios a quente. Suas dimensões são ilustradas na **Figura 41**.



**Figura 41:** Corpo de prova de embutimento paralelo às fibras.

Os ensaios de embutimento paralelo às fibras foram realizados com o dispositivo ilustrado pela **Figura 42**. O deslocamento da travessa foi aplicado com uma velocidade de 1,8 mm/min. Considerou-se finalizado o ensaio quando o embutimento do parafuso na madeira alcançou o correspondente a um diâmetro. O diâmetro do parafuso utilizado para os ensaios de embutimento foi de 10 mm.



**Figura 42:** Dispositivo de ensaio ao embutimento paralelo às fibras.

A resistência ao embutimento paralelo às fibras ( $f_{e0,\theta}$ ) foi determinada no patamar plástico de embutimento ( $F_{e\text{ máx}}$ ), obtido dos gráficos dos ensaios de embutimento paralelo e perpendicular às fibras, para os diferentes níveis de temperatura dos corpos de prova, conforme a Equação 11. O patamar plástico é alcançado quando o parafuso começa a esmagar as fibras na zona de contato entre a madeira e o parafuso.

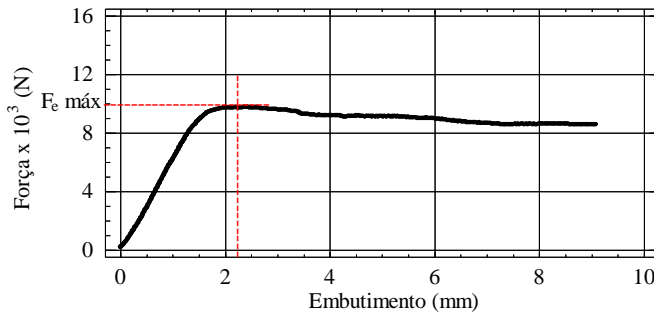
$$f_{e0,\theta} = \frac{F_{e\text{ máx}}}{td}, \quad (11)$$

onde:

$F_{e\text{ máx}}$ : força no patamar plástico, na direção paralela e normal, em N, para a temperatura  $\theta$  (**Figura 43**);

$t$ : espessura do corpo de prova, em mm;

$d$ : diâmetro do pino, em mm.



**Figura 43:** Diagrama de força  $\times$  deslocamento.

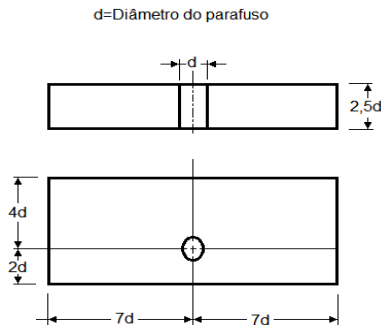
### 3.3.5 Ensaio de embutimento perpendicular às fibras

Os ensaios de resistência ao embutimento perpendicular às fibras foram realizados em amostras de *Pinus taeda* e de *Eucalytus saligna* com teor de umidade de 12% e massa específica média de 427 kg/m<sup>3</sup> e 793 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Cada amostra era composta por 150 corpos de prova distribuídos em 15 grupos de 10 corpos de prova cada um (**Tabela 23**).

**Tabela 23:** Valores médios das massas específicas dos corpos de prova de embutimento perpendicular às fibras à temperatura ambiente.

Temperatura de ensaio (°C)	<i>Pinus taeda</i>		<i>Eucalyptus saligna</i>	
	Massa específica (kg/m³)	Desvio padrão (kg/m³)	Massa específica (kg/m³)	Desvio padrão (kg/m³)
20	432	36	796	45
40	431	33	800	45
50	422	36	789	46
60	431	38	802	47
70	429	38	793	44
80	430	36	798	46
90	432	39	794	44
100	423	36	795	45
110	427	37	797	46
130	429	37	785	45
150	425	36	786	44
170	428	38	799	46
190	421	36	790	46
210	424	36	788	45
230	427	35	792	44

Os corpos de prova para o ensaio da resistência ao embutimento perpendicular às fibras foram confeccionados de acordo a norma AFNOR EN 383 (1993), devido também ao menor volume de madeira utilizado na sua elaboração e à boa manipulação desses corpos durante os ensaios a quente e cujas dimensões são ilustradas na **Figura 44**.



**Figura 44:** Corpo de prova de embutimento perpendicular às fibras.

Os ensaios de embutimento perpendicular às fibras foram realizados com o dispositivo ilustrado pela **Figura 45**. O deslocamento da travessa foi aplicado com uma velocidade de 1,8 mm/min.



Considerou-se finalizado o ensaio quando o embutimento do parafuso na madeira alcançou o correspondente a um diâmetro. O diâmetro do parafuso utilizado para os ensaios de embutimento foi de 10 mm.



**Figura 45:** Dispositivo de ensaio ao embutimento paralelo às fibras.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NO FINAL DE ENSAIO

A determinação do teor de umidade foi realizada depois do ensaio, e a partir dos próprios corpos de prova já ensaiados. Estes foram pesados, para a determinação da massa no momento do ensaio ( $m_e$ ). A seguir, foram submetidos à secagem a uma temperatura máxima de  $103 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme a norma NBR 7190:1997, até a ocorrência de uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida, sendo esta considerada a massa seca ( $m_s$ ). O teor de umidade foi determinado pela Equação 12.

$$U = \frac{m_e - m_s}{m_s} \times 100, \quad (12)$$

onde:

$m_e$ : massa inicial, em gramas;

$m_s$ : massa da madeira seca, em gramas.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DOS VALORES CARACTERÍSTICOS DE RESISTÊNCIA

A determinação dos valores característicos de resistência ( $f_{wk,\theta}$ ), nos diferentes níveis de temperatura, foi realizada segundo a metodologia estatística da distribuição t de Student, com  $v = n - 1$  graus de liberdade (MIRSHAWKA, 1981), conforme a Equação 13. O valor característico é definido como sendo o menor valor, que tem apenas 5% de probabilidade de ser ultrapassado em um dado lote. Neste trabalho, o número de corpos de prova por nível de temperatura era de 10 para o *Pinus taeda* e para o *Eucalytus grandis*, e 7 corpos de prova para o *Schizolobium amazonicum*, cujos valores são oriundos da dissertação de Manríquez (2008).

$$f_{wk,\theta} = \bar{f}_{w\theta} - t \cdot S_n, \quad (13)$$

onde:

$\bar{f}_{w\theta}$  é o valor médio da resistência da amostra na temperatura  $\theta$ , em MPa;

$t$ : é o valor t de Student;

$t = 1,833$ , para 9 grau de liberdade;

$t = 1,943$ , para 6 grau de liberdade;

$S_n$ : é o desvio padrão da resistência  $f_{w\theta}$  da amostra na temperatura  $\theta$ ;

$n$ : é o número de corpos de prova da amostra na temperatura  $\theta$ .

Para determinar a variância da amostra usou-se a Equação 14.

$$S_n^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (14)$$

onde:

$S_n$ : variância da amostra;

$\bar{x}$ : valor médio da amostra;

$x_i$ : valores individuais;

$n$ : número de leituras.

### 3.6 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados relativos aos ensaios de resistências à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo às fibras, ao embutimento perpendicular às fibras e à flexão estática do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum* foram tratados estatisticamente.

Para todas as propriedades mecânicas, foram determinadas as resistências normalizadas, foi feita análise de variância (ANOVA), usando intervalos LSD e de Bonferroni para as resistências normalizadas à temperatura ambiente e altas temperaturas. Da mesma forma, foram realizadas análises para as resistências normalizadas em função da massa específica. Os procedimentos são detalhados à continuação.

#### 3.6.1 Determinação da resistência normalizada

Todos os dados relativos às resistências à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras, e à flexão do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum* foram normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente. Denominou-se de resistência normalizada a razão entre os valores de resistências obtidas em diferentes níveis de temperatura e a resistência média obtida à temperatura ambiente ( $f_{w,0}/\bar{f}_{w,20^{\circ}C}$ ).

#### 3.6.2 Análise da resistência normalizada à temperatura ambiente e a altas temperaturas

Todos os dados relativos às resistências do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum* foram tratados estatisticamente, com um nível de confiança de 95% (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Para cada espécie ensaiada, foram efetuados dois tipos de tratamento estatístico. No primeiro, efetuou-se a análise de variância (ANOVA) para os valores de resistência normalizada, usando intervalos de confiança LSD, a fim de se determinar a existência ou não da influência da temperatura sobre as resistências. No segundo, foi feita a

comparação das resistências normalizadas entre as espécies estudadas, para cada nível de temperatura, a fim verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas na redução das resistências, usando intervalos de confiança LSD ou intervalos de confiança múltipla de Bonferroni, quando as amostras apresentavam quantidades diferentes de corpos de prova.

### 3.6.3 Análise da resistência normalizada em função da massa específica

Todos os dados relativos às resistências normalizadas do *Pinus taeda*, do *Eucalytus saligna* e do *Schizolobium amazonicum*, com seus respectivos valores de massa específica foram tratados estatisticamente, com um nível de confiança de 95% (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Os corpos de prova foram agrupados por faixas de massa específica, associados a seus respectivos valores médios de resistência normalizada, em razão de que a massa específica apresenta certa variabilidade. Este ordenamento permite identificar e determinar a influência da temperatura e da massa específica na resistência mecânica das três espécies ensaiadas.

Para analisar os resultados normalizados de cada propriedade estudada, foram realizados dois testes estatísticos. No primeiro, foi feita a comparação dos valores médios de resistência normalizada entre faixas de massa específica, em todos os níveis de temperatura, para determinar a existência ou não existência (E ou  $\bar{E}$ ) de diferenças estatisticamente significativas com um nível de confiança de 95%.

No segundo teste estatístico, efetuou-se a análise de variância multifatorial (ANOVA) para os valores de resistência normalizada entre duas faixas de massa específica, usando intervalos de confiança (LSD), a fim de se determinar a existência ou não da influência ( $\exists$  ou  $\bar{\exists}$ ) da temperatura sobre a resistência das propriedades estudadas.

Todas as análises foram realizadas dentro de cada espécie em duas faixas de massa específica e para diferentes espécies, numa faixa de massa específica.

### 3.7 COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os coeficientes de modificação em função da temperatura das resistências à compressão, à flexão, ao cisalhamento e ao embutimento para o *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum* foram determinados a partir dos valores característicos normalizados ( $f_{wk,0} / f_{wk,20^{\circ}C}$ ), obtidos para cada nível de temperatura das propriedades mecânicas estudadas.

A relação entre duas variáveis será linear quando essa pode ser obtida, aproximadamente, por meio da equação da reta. Observou-se que os comportamentos dos valores característicos normalizados em geral apresentam um comportamento não linear. Devido a isso foi escolhido representar este comportamento por trechos, considerando-os lineares dentro do intervalo especificado.

A partir dos valores característicos normalizados foi feita uma correlação entre uma variável dependente  $Y$  (valores característicos normalizados) e outra independente  $x$  (temperatura) de acordo com Equação 15.

$$Y = a + bx, \quad (15)$$

onde:

$a$  é o coeficiente linear, representa o ponto onde a reta corta o eixo das ordenadas;

$b$  é o coeficiente angular, representa o quanto varia a média de  $Y$  para um aumento de uma unidade da variável  $x$ .

Os parâmetros  $a$  e  $b$  serão estimados usando o método dos mínimos quadrados, de acordo com as seguintes equações;

$$S_e = \sqrt{\frac{SQR}{n-2}}, \quad (16)$$

$$SQR = S_{yy} - b \cdot S_{xy}, \quad (17)$$

$$S_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}, \quad (18)$$

$$S_{xy} = \sum y_i \cdot x_i - \frac{(\sum y_i)(\sum x_i)}{n}, \quad (19)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

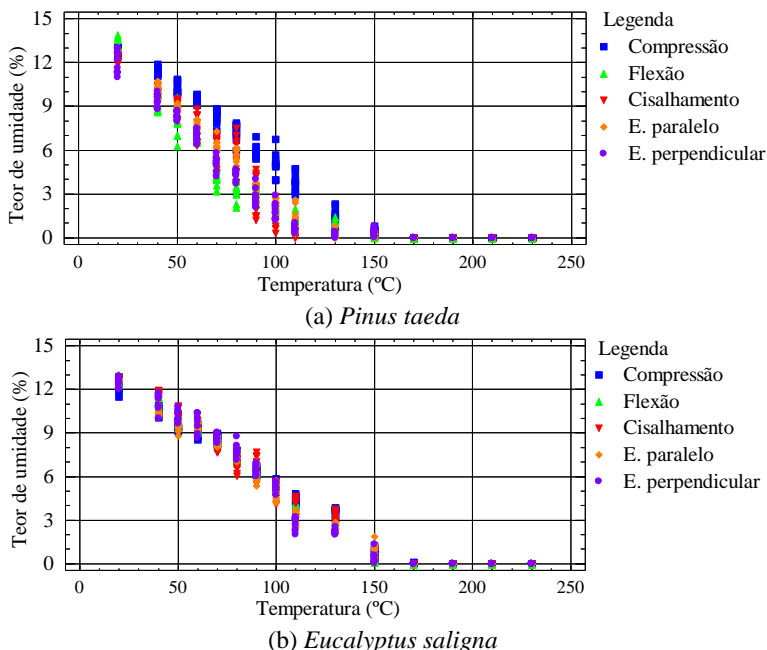
Neste capítulo são apresentados os resultados de teor de umidade, as alterações da madeira causadas pelo aquecimento, as falhas ocorridas durante os ensaios mecânicos, a influência da massa específica e da temperatura de ensaio na resistência mecânica da madeira, a influência da temperatura na resistência mecânica da madeira, os valores médios e característicos de resistência mecânica da madeira, a influência da temperatura sobre os valores característicos relativos das propriedades mecânicas, os coeficientes de modificação em função da temperatura para as resistências à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras e à flexão estática do *Pinus taeda* e do *Eucalyptus saligna*.

Com relação aos resultados obtidos para a espécie *Schizolobium amazonicum*, serão considerados aqueles relativos aos ensaios à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras. Não serão considerados os efeitos causados pela temperatura nos corpos de prova, porque eles já foram apresentados no trabalho de Manríquez (2008).

### 4.1 TEOR DE UMIDADE

As **Figuras 46a** e **46b** apresentam o teor de umidade dos corpos de prova para cada uma das propriedades ensaiadas após o período de aquecimento entre 120 e 210 min e a realização do ensaio mecânico de 8 a 10 min em câmara térmica, para as espécies de madeiras em estudo (**Apêndice 1**).

Como esperado, observou-se que o teor de umidade diminui linearmente com o aumento da temperatura do ensaio, apresentando os corpos de prova aproximadamente 0% de umidade a 150 °C. Pesquisas mostram que, para teores de umidade de 3%, a água contida na parede celular começa a ser eliminada quando os corpos de prova forem aquecidos a temperaturas superiores a 100 °C (SCHAFFER, 1973; GERHARDS, 1982). Schaffer (1973) observou que a água contida na estrutura interna da madeira começa a ser liberada a 140 °C. Para Kollmann (1968), esse processo ocorre a partir de 130 °C.

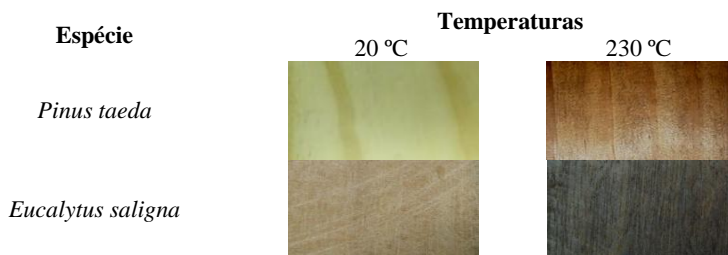


**Figura 46:** Teor de umidade dos corpos de prova após os ensaios.

A eliminação da água de adesão provoca uma leve elevação da resistência mecânica da madeira. Porém, se a temperatura de aquecimento continua aumentando, a água de constituição dos polímeros da madeira é eliminada, o que pode causar redução das propriedades mecânicas desse material (BODIG; JAYNE, 1993).

## 4.2 ALTERAÇÕES DA MADEIRA CAUSADAS PELO AQUECIMENTO

A **Figura 47** ilustra as alterações da coloração dos corpos de prova ocorridas durante o aquecimento dos mesmos, para as temperaturas de ensaio mínimas e máximas. Esse fenômeno foi observado para as duas espécies ensaiadas, porém em níveis diferentes de temperatura. Para os corpos de prova de *Pinus taeda*, uma resinosa, a alteração de cor foi constatada a partir de 130 °C, e para o *Eucalyptus saligna*, uma folhosa, a partir de 150 °C.



**Figura 47:** Alterações da coloração dos corpos de prova.

Segundo Brauner e Loos (1968), McMillen (1976) e Schmidt (1986), espécies resinosas submetidas a altas temperaturas tornam-se consideravelmente mais escuras do que algumas folhosas. Manninen et al. (2002), Sundqvist (2004) e Viitaniemi (2001) observaram, para algumas resinosas, que as alterações de cor na madeira, quando submetidas a temperaturas elevadas, ocorrem principalmente pela saída de extrativos e exsudação de resinas, de ceras e de compostos orgânicos que migram para a superfície da madeira. Para Fengel e Wegener (1989), esse fenômeno deve-se ao fato de que o *Pinus taeda* possui teores de resina e extrativos maiores, os quais migram à superfície da madeira, podendo se cristalizar e produzir uma pigmentação maior.

Nos corpos de prova da espécie *Pinus taeda*, nos ensaios realizados a partir de 80 °C, percebe-se o surgimento de pequenas fendas em seu topo, possivelmente causadas pela secagem acelerada (GERHARDS, 1979; SUNDQVIST, 2004). O aumento da temperatura provoca a saída de resina da estrutura da madeira, principalmente nas extremidades dos corpos de prova (**Figura 48a**). Por sua vez, as amostras de *Eucalyptus saligna*, uma folhosa, cuja madeira é originalmente rosada, não apresentaram mudança significativa de cor quando aquecidas entre 20 °C e 110 °C. A olho nu, esta mudança somente foi percebida a partir de 150 °C, sendo a coloração menos escura que aquela apresentada pelos corpos de prova de *Pinus taeda*. Foi constatado que, a partir de 60 °C, ocorreram fendas nos topos de todos os corpos de prova da espécie *Eucalyptus saligna*, sendo mais severas a partir de 150 °C (**Figura 48b**).

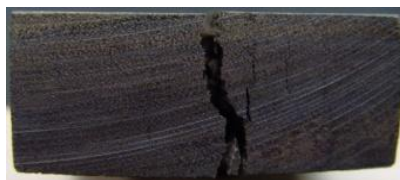
Sabe-se que as fendas aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidade entre a superfície e o centro da peça de madeira. Essas diferenças levam ao aparecimento de tensões que, tornando-se superiores à resistência dos tecidos lenhosos, provocam fendas na estrutura da madeira (SKAAR, 1984; SIAU, 1995). Para Skaar (1984),



as trincas internas aparecem na fase de secagem, quando se desenvolvem as tensões de tração no interior da peça.



(a) *Pinus taeda*



(b) *Eucalyptus saligna*

**Figura 48:** Saída de resina e fendas nos topos dos corpos de prova.

As diferenças físicas e anatômicas das espécies ensaiadas podem ser uma das causas da geração de fendas. Observou-se que, para o *Eucalyptus saligna*, as fendas são mais severas do que para o *Pinus taeda*. Segundo Mallan (1995), as tensões de crescimento provocam fendas severas nas extremidades das tábuas de *Eucalyptus saligna*.

As **Figuras 49a** e **49b** apresentam as falhas que ocorreram durante o aquecimento dos corpos de prova de compressão paralela às fibras. Devido ao aquecimento severo, os corpos de prova apresentaram defeitos com o aumento da temperatura de ensaio. Para o *Pinus taeda*, observou-se a ocorrência de pequenas rachaduras nos topos dos corpos de prova a partir de 40 °C até 130 °C. A partir de 150 °C, as rachaduras foram mais profundas, devidas principalmente à saída de água de impregnação na madeira (GERHARDS, 1982). Quando os corpos de prova atingiram 230 °C, ocorreram fendas profundas, com início de combustão do material lenhoso. Na região das fendas, a saída de voláteis dos componentes químicos da madeira ocorre com maior facilidade, graças à orientação das fibras da madeira. Com o aquecimento a altas temperaturas, inicia-se a degradação térmica dos corpos de prova (**Figura 49a**). Observou-se também o aumento da retração da secção transversal com o aumento da temperatura.

As mudanças na estrutura dos corpos de prova de *Eucalyptus saligna* iniciaram-se a 40 °C. Nesta temperatura, ocorreram pequenas rachaduras nos topos e nas faces dos mesmos. A partir de 150 °C, as fendas são mais profundas, sendo que a 230 °C alcançam sua extensão máxima, em alguns casos chegando a atravessar o corpo de prova (**Figuras 49b** e **51c**).

Em geral, foi observada, a olho nu, a degradação térmica significativa em todas as amostras ensaiadas a partir de 130 °C. Isso ocorre para as duas espécies estudadas. Porém, para avaliar e quantificar

adequadamente a degradação térmica da madeira, seria necessário realizar a análise térmica diferencial (DTA) dos corpos de prova no momento do ensaio.



230 °C

(a) *Pinus taeda*



230 °C

(b) *Eucalyptus saligna*

**Figura 49:** Rachaduras e combustão nos topos dos corpos de prova.

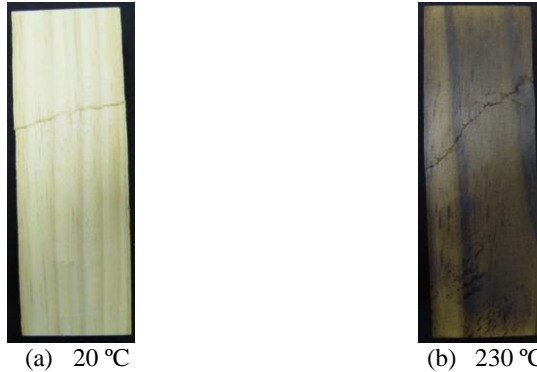
#### 4.3 FALHAS OCORRIDAS DURANTE OS ENSAIOS MECÂNICOS

Durante os ensaios do *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna* nos diferentes níveis de temperatura, foram observadas falhas dos corpos de prova durante os ensaios mecânicos, as quais serão detalhadas a seguir.

##### 4.3.1 Falhas dos corpos de prova à compressão paralela às fibras

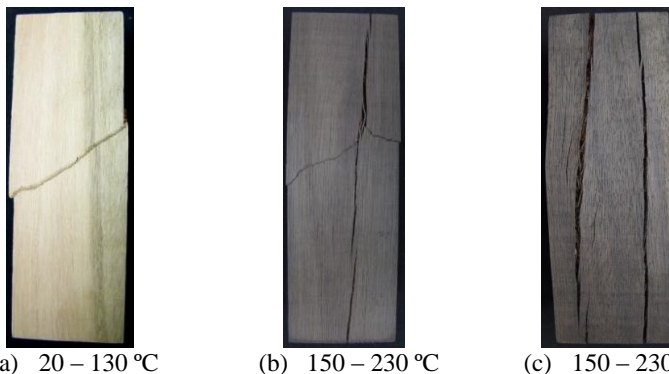
Durante os ensaios de compressão paralela às fibras, ocorreram falhas nos diferentes níveis de temperatura. As **Figuras 50a** e **50b** apresentam os tipos de falhas ocorridas nos corpos de prova de *Pinus taeda*. Foi observado que a forma da falha é afetada pela temperatura de ensaio. À temperatura ambiente, a linha de falha está quase na horizontal, enquanto a 230 °C a linha de falha está um pouco acima de 45°.

As **Figuras 51a**, **51b** e **51c** apresentam os tipos de falhas dos corpos de prova de *Eucalyptus saligna*. Observou-se que, durante os ensaios, ocorreram dois tipos de falhas. A primeira ocorreu entre 20 °C e 130 °C e situa-se no centro do corpo de prova (**Figura 51a**). Na segunda, entre 150 °C e 230 °C, a falha ocorreu próxima às extremidades dos corpos de prova. Neste nível de temperatura ocorrem fendas profundas nas faces dos corpos de prova devidas ao aquecimento severo. Essas fendas provocam planos de debilidade nos corpos de prova, os quais levam à sua ruptura (**Figura 51b**).



**Figura 50:** Ruptura dos corpos de prova de compressão paralela às fibras de *Pinus taeda*.

A **Figura 51c** apresenta as rachaduras longitudinais nas faces dos corpos de prova de *Eucalyptus saligna* entre 150 °C e 230 °C. Estas podem ser devidas ao aquecimento brusco e, principalmente, aos valores elevados de massa específica dos corpos de prova. Todos os corpos de prova com massa específica acima de 700 kg/m<sup>3</sup> apresentaram esses tipos de falha e ruptura frágil.



**Figura 51:** Ruptura dos corpos de prova de compressão paralela às fibras de *Eucalyptus saligna*.

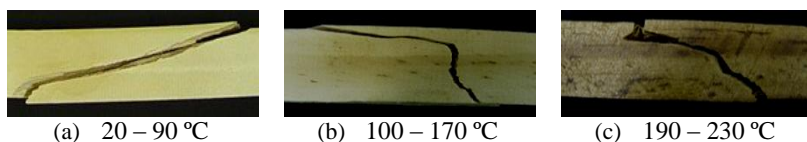
Os resultados obtidos por Young e Clancy (2001) para o *Pinus radiata*, entre 20 °C e 250 °C, em ensaios à compressão paralela às fibras, são similares aos obtidos neste trabalho com o *Pinus taeda*. Manríquez (2008), em ensaios à compressão paralela às fibras com

*Schizolobium amazonicum*, observou que a forma de ruptura varia com a temperatura de ensaio. Segundo Bodig e Jayne (1993), as rupturas dos corpos de prova submetidos à compressão paralela às fibras ocorrem pelas forças cortantes máximas em um ângulo à superfície carregada e associada com um plano mais fraco, conforme apresentada pela teoria da Mecânica dos Sólidos.

#### 4.3.2 Falhas dos corpos de prova à flexão

Os corpos de prova de *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, em ensaio de flexão estática, apresentaram diferentes formas de ruptura em função da temperatura de ensaio (**Figuras 52 e 53**).

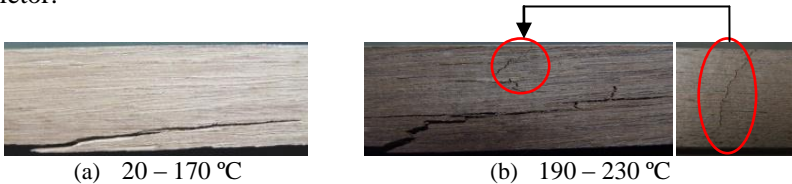
Nos ensaios dos corpos de prova da espécie *Pinus taeda*, entre 20 °C e 90 °C, observou-se que ocorre ruptura por tração paralela às fibras no sentido do eixo dos corpos de prova (**Figura 52a**). Já entre 100 °C e 170 °C, ocorre uma combinação entre ruptura por tração e separação das camadas de fibras na madeira. Segundo Bodig e Jayne (1993), esse tipo de ruptura é devido, principalmente, ao baixo teor de umidade dos corpos de prova, o que foi constatado na presente pesquisa e ilustrado na **Figura 52b**. A 150 °C, os corpos de prova apresentavam 0% de teor de umidade (**Figura 46a**). Por sua vez, a **Figura 52c** mostra a ruptura frágil dos corpos de prova aquecidos a temperaturas situadas entre 190 °C e 230 °C. Esse tipo de ruptura pode ser devido à degradação térmica dos componentes químicos da madeira (SCHAFFER, 1973; GERHARDS 1979).



**Figura 52:** Ruptura dos corpos de prova de flexão de *Pinus taeda*.

A **Figura 53a** apresenta a ruptura dos corpos de prova de *Eucalyptus Saligna* entre 20 °C e 170 °C. Nessa faixa de temperatura, foi observada a ocorrência de ruptura por tração paralela às fibras da madeira. Entre 190 °C e 230 °C, a ruptura ocorre por compressão na parte superior do corpo de prova (**Figura 53b**), o que pode ser devido à degradação térmica da madeira. Segundo Bodig e Jayne (1993), esse tipo de falha ocorre em madeiras de tom claro e de baixa massa específica, o que não é o caso da madeira ensaiada.

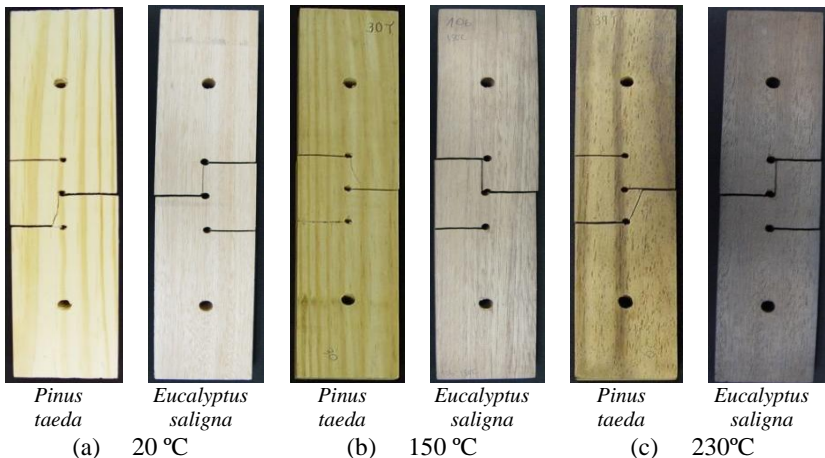
Em geral, as rupturas dos corpos de prova das duas espécies ensaiadas à flexão estática caracterizam-se por apresentar falhas na metade do seu comprimento, na região submetida somente a momento fletor.



**Figura 53:** Ruptura dos corpos de prova de flexão de *Eucalyptus saligna*.

#### 4.3.3 Falhas dos corpos de prova ao cisalhamento paralelo às fibras

As **Figuras 54a, 54b e 54c** ilustram as formas de ruptura dos corpos de prova durante os ensaios de cisalhamento paralelo às fibras do *Pinus taeda* e do *Eucalyptus saligna*.



**Figura 54:** Ruptura dos corpos de prova ao cisalhamento do *Pinus taeda* e do *Eucalyptus saligna*.

Para as duas espécies ensaiadas, nos diferentes níveis de temperatura, foi constatado que não existem diferenças significativas entre as rupturas dos corpos de prova. As falhas em todos os corpos de prova ocorreram por cisalhamento paralelo às fibras.

Observou-se que a força aplicada provoca cisalhamento puro na secção, devido ao fato de a ruptura ocorrer no plano de cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova. Manríquez e Moraes (2010) observaram o mesmo comportamento para a espécie *Schizolobium amazonicum*.

As rupturas dos corpos de prova submetidos a cisalhamento, em diferentes níveis de temperatura, podem ser devidas a falhas que se situam entre as fibras da madeira, especificamente na parede celular. Como a parede celular é composta por fibrilas constituídas por celulose e hemicelulose e arranjadas em camadas delgadas unidas por lignina, as quais se cruzam formando um aspecto de redes, orientadas principalmente no sentido longitudinal, pode-se afirmar que essas falhas ocorrem nessa área.

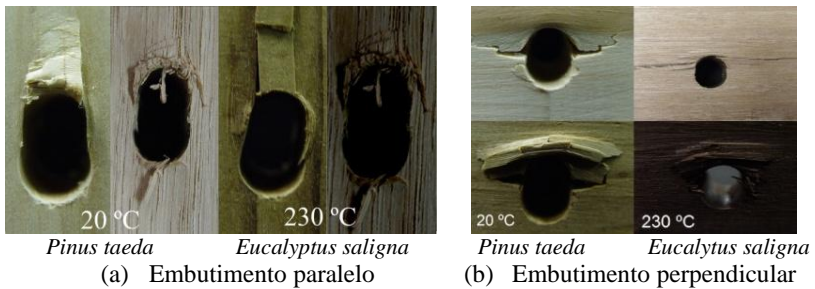
Sabe-se que a lignina é responsável pela resistência aos esforços cortantes quando a madeira está submetida a uma carga axial. Segundo Ifju (1964), o componente da madeira que suporta carga aplicada na direção paralela às fibras é principalmente a lignina, que se encontra entre as cadeias de celulose e que funciona como uma substância adesiva entre elas. Fengel e Wegener (1989) afirmam que a lignina é uma resina amorfa que atua como um cimento entre as fibrilas e a força de adesão entre as fibras de celulose. Sabe-se que a lignina caracteriza-se pela existência de ligações covalentes entre as cadeias de lignina e os constituintes da celulose e da hemicelulose.

#### 4.3.4 Falhas dos corpos de prova ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras

Durante os ensaios de embutimento da madeira, foram observados dois tipos de falhas: por embutimento (**Figura 55**) e por fendilhamento (**Figuras 56 e 57**). As falhas por embutimento ocorridas nos corpos de prova de embutimento paralelo às fibras foram semelhantes para o *Pinus taeda* e para o *Eucalyptus saligna*. Elas se caracterizaram por um esmagamento das fibras mais próximas ao parafuso, seguido da ruptura destas, o que poderia ser considerado o início do fendilhamento da região. Este tipo de falha foi observado para todas as faixas de temperatura (**Figura 55a**), com exceção daquelas apresentadas na **Tabela 24**.

Nos ensaios de embutimento perpendicular às fibras do *Pinus taeda* e do *Eucalyptus saligna* também ocorreram falhas por embutimento, sendo observado o esmagamento das fibras na zona de

contato entre a madeira e o pino metálico, com forte adensamento e posterior rasgamento e rompimento por tração das mesmas (**Figura 55b**). O término dos ensaios de embutimento paralelo às fibras foi caracterizado pelo embutimento de 10 mm do parafuso na madeira, em todos os níveis de temperatura, com exceção daquelas apresentadas na **Tabela 24** indicando o comportamento plástico acentuado para as duas espécies. Isso é positivo no comportamento de ligações, pois indica a capacidade de ambas às espécies de absorver deformações sem se romperem.



**Figura 55:** Ruptura por embutimento.

As falhas por fendilhamento ocorreram nos ensaios de embutimento paralelo, em decorrência da ruptura por tração normal às fibras ao longo de planos paralelos na direção da força transmitida pelo parafuso à madeira (**Figura 56**). Elas se localizaram entre os anéis de crescimento, na zona do lenho inicial, por esta ser mais fraca do que a zona do lenho tardio. Observou-se que esse tipo de ruptura ocorreu em temperaturas diferentes para as duas espécies estudadas. Para o *Pinus taeda* ocorreu a 130 °C, 150 °C e 170 °C, enquanto para o *Eucalyptus saligna* aconteceu a 150 °C, 170 °C, 190 °C, 210 °C e 230 °C (**Tabela 24**).

**Tabela 24:** Número de corpos de prova fendilhados.

Amostras	Temperaturas de ocorrência do fendilhamento (°C)					
	130	150	170	190	210	230
<i>Pinus taeda</i>	2	4	2	0	0	0
<i>Eucalyptus saligna</i>	0	6	10	6	8	4



**Figura 56:** Ruptura por fendilhamento paralelo as fibras.

A ocorrência da ruptura por fendilhamento em diferentes níveis de temperatura do *Pinus taeda* e do *Eucalyptus saligna* pode estar associada à resposta que cada espécie apresenta, graças às suas características anatômicas, aos níveis de tensões internas causadas pela velocidade de aquecimento do corpo de prova (SKAAR, 1984; SIAU, 1995) e também ao comportamento de seu polímero.

Sabe-se que os polímeros da madeira sofrem influência do teor de umidade e da temperatura. O baixo teor de umidade causa o deslocamento das temperaturas de transição vítrea da celulose, da hemicelulose e da lignina para temperaturas maiores, e as temperaturas elevadas causam a degradação térmica das cadeias poliméricas.

Salmen (1982) mostra que a temperatura de transição vítrea da lignina seca varia entre 124 °C e 193 °C. Outros autores verificaram que ocorrem mudanças visíveis na estrutura da lignina a temperaturas superiores a 120 °C (KOŠÍKOVÁ et al., 1999; KACÍK et al., 1999).

Visto que a lignina desempenha a função de adesivo entre as cadeias de celulose e hemicelulose da parede celular, e essas últimas são responsáveis por conferir rigidez e resistência mecânica à madeira (IFJU, 1964), a ocorrência do fendilhamento dos corpos de prova pode estar associada à ação da temperatura sobre esse polímero.

As falhas por fendilhamento, nos ensaios de embutimento perpendicular às fibras (**Figura 57**), ocorreram somente para a espécie *Eucalyptus saligna*. Observou-se que esta falha ocorreu praticamente em todos os níveis de temperatura, com a exceção de 210 °C e 230 °C, em que ocorreu ruptura por embutimento do parafuso na madeira. Esta ruptura se caracteriza pelo esmagamento das fibras aderentes ao parafuso e o forte adensamento das mesmas (**Figura 58**).





**Figura 57:** Ruptura por fendilhamento perpendicular às fibras do *Eucalyptus saligna*.



**Figura 58:** Ruptura por embutimento perpendicular às fibras do *Eucalyptus saligna*.

#### 4.4 INFLUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA E DA TEMPERATURA DE ENSAIO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA

Nesta seção, serão apresentados os resultados da análise da influência da massa específica e da temperatura sobre a resistência normalizada. Essas análises serão feitas para cada espécie e entre as espécies, para todas as propriedades estudadas nesta pesquisa. Os valores normalizados foram determinados pela razão entre os valores médios de resistência nos diferentes níveis de temperatura e os obtidos à temperatura ambiente ( $f_{w,\theta}/\bar{f}_{w,20\text{ }^{\circ}\text{C}}$ ) (**Apêndice 2**).

##### 4.4.1 Análise do *Pinus taeda*

A **Tabela 25** apresenta os resultados da análise da influência da temperatura e da massa específica na resistência mecânica do *Pinus taeda* sobre os valores médios de resistência normalizada, para as faixas de temperaturas indicadas. Para as propriedades em estudo, foram comparados, com 95% de confiança, os valores médios de resistência normalizada por nível de temperatura entre as faixas de massa

específica. O valor médio das diferenças entre as duas faixas de massa específica, para cada uma das propriedades estudadas, foi de  $63 \text{ kg/m}^3$ .

Em geral, pode-se afirmar que, em pequenas variações de massa específica devidas ao aquecimento entre  $20^\circ\text{C}$  e  $230^\circ\text{C}$ , dentro da mesma espécie, a massa específica não influencia significativamente na diminuição da resistência mecânica da madeira, visto que, para os ensaios à compressão paralela às fibras, não existem diferenças estatisticamente significativas em 57% dos ensaios realizados. Para os ensaios à flexão estática, isso ocorre em 86% dos ensaios. Já para os ensaios ao cisalhamento paralelo às fibras, ocorre em 57% dos ensaios. Para os ensaios ao embutimento paralelo às fibras, em 64% dos ensaios realizados.

**Tabela 25:** Comparação dos valores médios das resistências normalizadas do *Pinus taeda*.

$\theta^\circ\text{C}$	Propriedades mecânicas				
	Massa específica no momento do ensaio ( $\text{kg/m}^3$ )				
	(370-420) e (425-470)	(370-420) e (425-470)	(370-435) e (440-510)	(370-435) e (440-490)	(370-420) e (425-530)
	$f_{c0,\theta}/f_{c0,20^\circ\text{C}}$	$f_{m,0}/f_{m,20^\circ\text{C}}$	$f_{v,0}/f_{v,20^\circ\text{C}}$	$f_{e0,\theta}/f_{e0,20^\circ\text{C}}$	$f_{e90,\theta}/f_{e90,20^\circ\text{C}}$
20					
40	∄	E	∄	∄	∄
50	∄	∄	E	∄	E
60	∄	E	E	∄	∄
70	∄	∄	∄	E	E
80	E	∄	∄	E	∄
90	E	∄	E	∄	∄
100	∄	∄	∄	∄	∄
110	E	∄	∄	E	∄
130	∄	∄	E	∄	∄
150	E	∄	E	∄	∄
170	∄	∄	E	∄	∄
190	E	∄	∄	E	∄
210	∄	∄	∄	E	E
230	E	∄	∄	∄	∄
	∃	∃	∃	∃	∃

E	Existe uma diferença significativa entre as médias $\mu_1 \neq \mu_2$
∄	Não existe uma diferença significativa entre as médias $\mu_1 = \mu_2$
∃	Existe uma diferença significativa (ANOVA multifatorial)

Finalmente, para os ensaios ao embutimento perpendicular às fibras, não existem (Æ) diferenças estatisticamente significativas em 79% dos ensaios realizados. As temperaturas nas quais existem (E) diferenças estão especificadas na **Tabela 25**.

Quando os resultados de resistência normalizada, para todas as propriedades estudadas do *Pinus taeda*, foram submetidos a uma análise de variância multifatorial (ANOVA) entre as faixas de massas específicas por nível de temperatura, observou-se que existem diferenças estatisticamente significativas, com 95% de confiança, para todas as resistências normalizadas em todos os níveis de temperatura (**Apêndice 2-1**).

#### 4.4.2 Análise do *Eucalyptus saligna*

A **Tabela 26** apresenta os resultados da análise da influência da temperatura e da massa específica na resistência mecânica do *Eucalyptus saligna* sobre os valores médios de resistência normalizada, para as faixas de temperaturas indicadas. Para as propriedades em estudo, foram comparados, com 95% de confiança, os valores médios de resistência normalizada por nível de temperatura entre as faixas de massa específica. O valor médio das diferenças entre as duas faixas de massa específica, para cada uma das propriedades estudadas, foi de 92 kg/m<sup>3</sup>.

Verificou-se que para variações maiores de massa específica devidas ao aquecimento entre 20 °C e 230 °C, dentro da mesma espécie, não há influência significativa na diminuição da resistência mecânica da madeira para os ensaios de flexão estática e em 93% dos ensaios realizados, já para embutimento paralelo às fibras, em 71% dos ensaios. No entanto, para os ensaios à compressão paralela às fibras, existem diferenças significativas em 65% deles; já para os ensaios ao cisalhamento paralelo às fibras essas diferenças persistem em 57%.

Quando os resultados de resistência normalizada para todas as propriedades estudadas do *Eucalyptus saligna* foram submetidos a uma análise de variância multifatorial (ANOVA) entre as faixas de massas específicas por nível de temperatura, observou-se que existem diferenças estatisticamente significativas, com 95% de confiança, para compressão, para cisalhamento e para embutimento perpendicular às fibras, significando que a temperatura influencia na resistência mecânica da madeira. Por sua vez, para os ensaios à flexão estática e ao

embutimento paralelo essas diferenças não existem entre os resultados obtidos nos diferentes níveis de temperatura, o que significa que, para estas propriedades a temperatura não influencia na resistência mecânica (**Apêndice 2-2**).

**Tabela 26:** Comparação dos valores médios das resistências normalizadas do *Eucalyptus saligna*.

$\theta$ °C	Propriedades mecânicas				
	Massa específica no momento do ensaio (kg/m <sup>3</sup> )				
	(640-750) e (760-870)	(730-775) e (776-820)	(650-785) e (790-890)	(730-800) e (805-890)	(710-790) e (795-880)
	$f_{c0,\theta}/f_{c0,20}^{\circ}\text{C}$	$f_{m,\theta}/f_{m,20}^{\circ}\text{C}$	$f_{v,\theta}/f_{v,20}^{\circ}\text{C}$	$f_{e0,\theta}/f_{e0,20}^{\circ}\text{C}$	$f_{e90,\theta}/f_{e90,20}^{\circ}\text{C}$
20					
40	∄	∄	E	∄	E
50	∄	∄	∄	∄	E
60	E	∄	E	∄	E
70	∄	∄	∄	∄	∄
80	E	∄	∄	E	∄
90	E	∄	E	E	∄
100	E	∄	E	E	E
110	∄	∄	E	∄	∄
130	E	E	E	∄	E
150	E	∄	∄	E	∄
170	E	∄	∄	∄	E
190	E	∄	E	E	∄
210	∄	∄	∄	∄	∄
230	E	∄	E	∄	∄
	∃	∄	∃	∄	∃

E	Existe uma diferença significativa entre as médias $\mu_1 \neq \mu_2$
∄	Não existe uma diferença significativa entre as médias $\mu_1 = \mu_2$
∃	Existe uma diferença significativa (ANOVA multifatorial)
∄	Não existe uma diferença significativa (ANOVA multifatorial)

#### 4.4.3 Análise do *Schizolobium amazonicum*

A **Tabela 27** apresenta os resultados da análise da influência da temperatura e da massa específica na resistência mecânica do *Schizolobium amazonicum*, sobre os valores médios de resistência normalizada, para as faixas de temperaturas indicadas. Para as propriedades em estudo, foram comparados, com 95% de confiança, os

valores médios de resistência normalizada por nível de temperatura entre as faixas de massa específica. O valor médio das diferenças entre as duas faixas de massa específica, para cada uma das propriedades estudadas, foi de 67 kg/m<sup>3</sup> (Apêndice 2-3).

**Tabela 27:** Comparação dos valores médios das resistências normalizadas do *Schizolobium amazonicum*.

$\theta$ °C	Propriedades mecânicas			
	Massa específica no momento do ensaio (kg/m <sup>3</sup> )			
	(295-360) e (365-430)	(300-370) e (372-420)	(280-350) e (351-410)	(290-360) e (361-430)
	$f_{c0,\theta} / f_{c0,20}^{\circ\text{C}}$	$f_{v,\theta} / f_{v,20}^{\circ\text{C}}$	$f_{e0,\theta} / f_{e0,20}^{\circ\text{C}}$	$f_{e90,\theta} / f_{e90,20}^{\circ\text{C}}$
20				
40	∄	E	E	∄
50	∄	E	∄	∄
60	∄	∄	∄	∄
70	∄	∄	∄	E
80	∄	∄	∄	∄
90	∄	∄	∄	E
100	E	∄	∄	∄
110	∄	∄	∄	∄
130	∄	∄	E	∄
150	∄	∄	∄	∄
170	∄	∄	∄	∄
190	E	∄	∄	∄
210	∄	∄	∄	E
230	∄	∄	∄	∄
	∄	∃	∄	∄

E	Existe uma diferença significativa entre as médias $\mu_1 \neq \mu_2$
∄	Não existe uma diferença significativa entre as médias $\mu_1 = \mu_2$
∃	Existe uma diferença significativa (ANOVA multifatorial)
∄	Não existe uma diferença significativa (ANOVA multifatorial)

Em geral, pode-se afirmar que pequenas variações de massa específica devidas ao aquecimento entre 20 °C e 230 °C, dentro da mesma espécie, não influenciam significativamente na diminuição da resistência mecânica da madeira, visto que, para os ensaios à compressão paralela às fibras, não existem diferenças estatisticamente significativas em 86% dos ensaios realizados. Já para os ensaios ao cisalhamento paralelo às fibras, em 86% dos ensaios. Para os ensaios ao

embutimento paralelo às fibras, em 86% dos ensaios realizados. Finalmente, para os ensaios ao embutimento perpendicular às fibras, não existem diferenças estatisticamente significativas em 79% dos ensaios realizados. As temperaturas nas quais existem diferenças estão especificadas na **Tabela 27**.

Quando os resultados de resistência normalizada para todas as propriedades estudadas do *Schizolobium amazonicum* foram submetidos a uma análise de variância multifatorial (ANOVA) entre as faixas de massas específicas por nível de temperatura, observou-se que não existem diferenças estatisticamente significativas, com 95% de confiança, para os ensaios de compressão, embutimento paralelo e perpendicular às fibras cisalhamento paralelo às fibras, o que significa que a temperatura não influencia na resistência mecânica. Por sua vez, para o ensaio ao cisalhamento paralelo às fibras, a temperatura influencia na resistência mecânica.

#### 4.4.4 Análise comparativa entre o *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*

A **Tabela 28** apresenta os resultados da análise da influência da temperatura e da massa específica na resistência mecânica do *Pinus taeda* e do *Schizolobium amazonicum* sobre os valores médios de resistência normalizada, para as faixas de temperaturas indicadas. Para as propriedades em estudo, foram comparados, com 95% de confiança, os valores médios de resistência normalizada por nível de temperatura entre as faixas de massa específica. O valor médio das diferenças entre as duas faixas de massa específica para cada uma das propriedades estudadas, foi de 63 kg/m<sup>3</sup>.

Verificou-se que, que a massa específica e a temperatura influenciam na resistência mecânica do *Pinus taeda* e do *Schizolobium amazonicum*, para os ensaios à compressão paralela às fibras para todos os níveis de temperatura. Já para os ensaios ao embutimento paralelo às fibras, a massa específica e a temperatura influenciam sobre a resistência mecânica em 86% dos ensaios e, para os ensaios ao embutimento perpendicular às fibras, influenciam em 93% dos ensaios realizados. Finalmente, para os ensaios ao cisalhamento paralelo às fibras, a massa específica e temperatura não influenciam em 50% dos ensaios realizados.

Os resultados mostram que a diminuição de resistência mecânica por efeito da temperatura não é a mesma quando a comparação é feita

entre duas espécies sendo o *Pinus taeda* uma resinosa e o *Schizolobium amazonicum* uma folhosa. Isso pode ser causado pelas diferenças anatômicas das espécies estudadas.

Na análise de variância (ANOVA multifatorial) dos resultados de resistência normalizados para todas as propriedades estudadas do *Pinus taeda* e do *Schizolobium amazonicum* e para a mesma faixa de massas específicas, usando o intervalo de Bonferroni, verificou-se que existem diferenças estatisticamente significativas para todas as propriedades estudadas em todos os níveis de temperatura. Isso significa que a temperatura influencia diretamente na resistência mecânica da madeira (Apêndice 2-4).

**Tabela 28:** Comparação dos valores médios das resistências normalizadas entre *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*.

$\theta$ °C	Propriedades mecânicas			
	Massa específica no momento do ensaio (kg/m <sup>3</sup> )			
	(370-435)	(372-435)	(373-435)	(374-435)
	$f_{c0,\theta}/f_{c0,20}^{\circ}\text{C}$	$f_{v,\theta}/f_{v,20}^{\circ}\text{C}$	$f_{e0,\theta}/f_{e0,20}^{\circ}\text{C}$	$f_{e90,\theta}/f_{e90,20}^{\circ}\text{C}$
20				
40	E	∄	E	E
50	E	∄	E	E
60	E	∄	∄	E
70	E	E	E	E
80	E	∄	E	E
90	E	∄	E	E
100	E	E	E	∄
110	E	E	E	E
130	E	∄	E	E
150	E	E	E	E
170	E	∄	E	E
190	E	E	∄	E
210	E	E	E	E
230	E	E	E	E
	∃	∃	∃	∃

E	Existe uma diferença significativa entre as médias $\mu_1 \neq \mu_2$
∄	Não existe uma diferença significativa entre as médias $\mu_1 = \mu_2$
∃	Existe uma diferença significativa (ANOVA multifatorial)

## 4.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA

Nesta seção serão apresentados os resultados de resistência à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras e à flexão estática do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum*. Para cada ensaio foram elaborados 150 corpos de prova distribuídos em 15 grupos, cada grupo constituído por 10 corpos de prova, sendo um total de 750 ensaios para o *Pinus taeda*, 750 ensaios para o *Eucalyptus saligna* e 525 para o *Schizolobium amazonicum*. Os grupos foram ensaiados entre 20 °C e 230 °C. Todas as amostras apresentavam teor de umidade inicial médio de 12% (**Apêndice 3**).

### 4.5.1 Resistência mecânica à compressão paralela às fibras

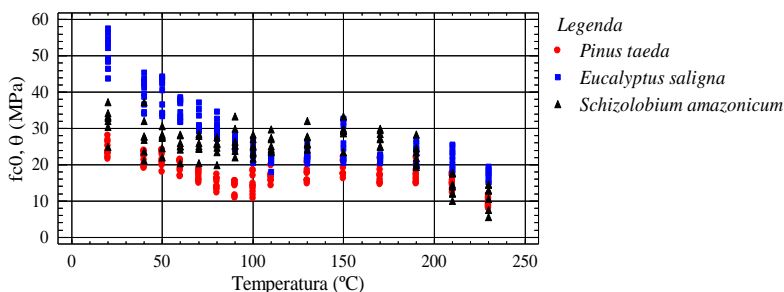
Os ensaios à compressão paralela às fibras foram realizados em corpos de prova de *Pinus taeda* com massa específica média aparente de 430 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 27 kg/m<sup>3</sup>, de *Eucalyptus saligna* com massa específica aparente de 745 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 65 kg/m<sup>3</sup> e de *Schizolobium amazonicum* com massa específica aparente de 378 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 29 kg/m<sup>3</sup>.

A **Figura 59** ilustra os resultados de resistência à compressão paralela às fibras das três espécies. Para o *Pinus taeda*, foi observada uma dispersão da resistência entre as temperaturas de 20 °C e 100 °C, com o coeficiente de variação médio de 10,9%. Para valores acima de 100 °C, o coeficiente de variação médio foi de 13%. O coeficiente de variação total do ensaio foi de 23,2%. Para o *Eucalyptus saligna*, verificou-se a existência de um coeficiente de variação mínimo a 170 °C, com 3,6% e um máximo de 19% a 150 °C. O coeficiente de variação total do ensaio foi de 32,7%. Já para o *Schizolobium amazonicum*, observou-se que existe uma dispersão menor, com coeficiente de variação médio 6,8% entre 20 °C e 100 °C, para valores acima de 100 °C a variação é maior, com coeficiente de variação médio de 8,5%.

As análises de variância efetuadas com as amostras de *Pinus taeda* e de *Eucalyptus saligna* indicam que existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de resistência à compressão paralela às fibras a 20 °C e as demais resistências obtidas



em outros níveis de temperaturas. Já para o *Schizolobium amazonicum*, essas diferenças existem, com exceção daquela obtida a 150 °C.



**Figura 59:** Resistência mecânica à compressão paralela às fibras.

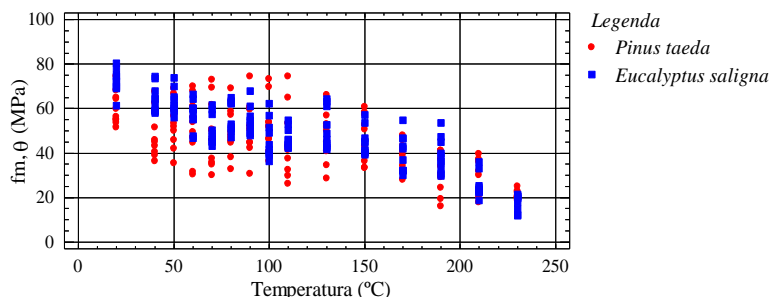
#### 4.5.2 Resistência mecânica à flexão estática

Os ensaios à flexão estática foram realizados em amostras de *Pinus taeda* e de *Eucalyptus saligna*. A amostra de *Pinus taeda* apresentava massa específica média aparente de 427 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 42 kg/m<sup>3</sup>, e a de *Eucalyptus saligna*, com massa específica média aparente de 774 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 26 kg/m<sup>3</sup>.

A **Figura 60** ilustra os resultados de resistência mecânica à flexão estática do *Pinus taeda* e do *Eucalyptus saligna*. Na amostra de *Pinus taeda*, observou-se que existe grande dispersão dos resultados em todos os níveis de temperatura. A maior variação foi de 34,7% a 110 °C, sendo o coeficiente de variação do ensaio de 31%. A análise de variância indica que não existem diferenças estatisticamente significativas, somente entre os resultados de resistência à flexão estática a 20 °C e os obtidos a 50 °C, 60 °C, 90 °C e 100 °C.

Na amostra de *Eucalyptus saligna*, constata-se que, entre 20 °C e 90 °C, o coeficiente de variação foi de 10,5%. Entre 100 °C e 230 °C foi de 17,6%. A análise de variância indica que existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de resistência à flexão estática a 20 °C e as demais temperaturas.

Foi constatado que a amostra de *Pinus taeda* apresenta uma dispersão maior que a de *Eucalyptus saligna* entre 20 °C e 150 °C com coeficientes de variação de 23,6% e 12%, respectivamente.

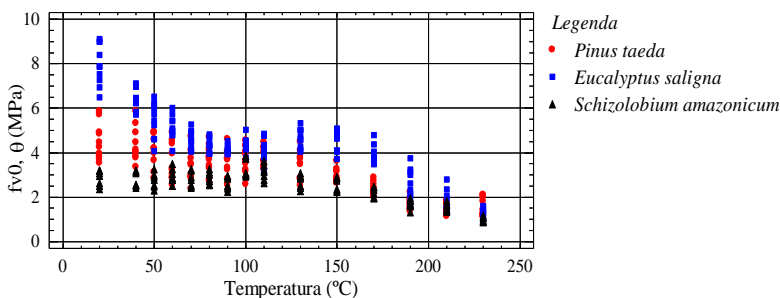


**Figura 60:** Resistência mecânica à flexão estática.

#### 4.5.3 Resistência mecânica ao cisalhamento paralelo às fibras

Os ensaios ao cisalhamento paralelo às fibras foram realizados em três espécies de madeira: *Pinus taeda* com massa específica média aparente de  $440 \text{ kg/m}^3$  e desvio padrão de  $38 \text{ kg/m}^3$ ; *Eucalyptus saligna* com massa específica aparente de  $775 \text{ kg/m}^3$  e desvio padrão de  $64 \text{ kg/m}^3$ ; e *Schizolobium amazonicum* com massa específica aparente de  $388 \text{ kg/m}^3$  e desvio padrão de  $30 \text{ kg/m}^3$ .

A **Figura 61** ilustra os resultados de resistência mecânica ao cisalhamento paralelo às fibras do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum*. Na amostra de *Pinus taeda*, observou-se uma dispersão de 18,6%, entre 20 °C e 100 °C; já entre 110 °C e 230 °C a dispersão foi de 16,2%. A análise de variância indica que existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras a 20 °C e as demais temperaturas, com exceção das 40 °C e 50 °C.



**Figura 61:** Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Para o *Eucalyptus saligna*, foi constatado que a menor dispersão foi de 4,7% a 90 °C, e a maior foi de 26,2% a 190 °C. A análise de variância indica que existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras a 20 °C e as demais temperaturas.

Para o *Schizolobium amazonicum*, existe uma dispersão muito baixa nos resultados, com um coeficiente de variação médio entre 20 °C e 230 °C de 11,1%. Verificou-se, por meio da análise de variância, com 95% de confiança, que não existem diferenças significativas entre a resistência ao cisalhamento à 20 °C e as temperaturas de 40 °C, 50 °C, 70 °C, 90 °C e 130 °C. A análise também mostra que existem diferenças significativas entre a resistência ao cisalhamento e os outros níveis de temperatura.

#### 4.5.4 Resistência mecânica ao embutimento paralelo às fibras

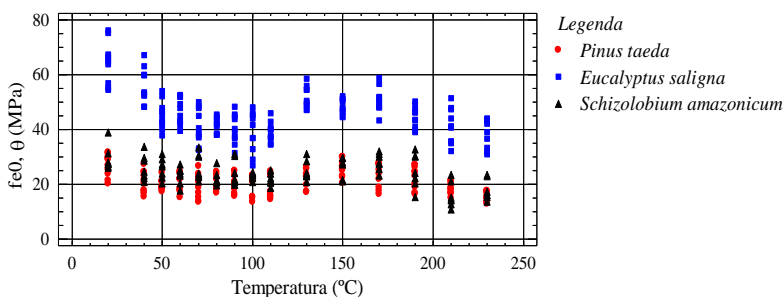
Os ensaios ao embutimento paralelo às fibras foram realizados em três espécies de madeira: *Pinus taeda* com massa específica média aparente de 430 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 27 kg/m<sup>3</sup>; *Eucalyptus saligna*, com massa específica média aparente de 801 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 40 kg/m<sup>3</sup>; e *Schizolobium amazonicum*, com massa específica média aparente de 362 kg/m<sup>3</sup>, com desvio padrão de 34 kg/m<sup>3</sup>.

A **Figura 62** ilustra os resultados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum*. Na amostra do *Pinus taeda*, foi constatada uma dispersão máxima de 22,9% a 70 °C, e, a 50 °C, uma dispersão mínima de 10,3%. A análise de variância indica que existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de resistência ao embutimento paralelo às fibras a 20 °C e as demais temperaturas, com exceção dos valores obtidos a 150 °C.

Para o *Eucalyptus saligna*, observou-se que a menor dispersão foi de 6,5% a 80 °C e a maior foi 19,1% a 100 °C. A análise de variância para o *Pinus taeda* e para o *Eucalyptus saligna* indica que existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de resistência ao embutimento às fibras a 20 °C e as demais temperaturas.

Para o *Schizolobium amazonicum*, existe uma dispersão mínima a 100 °C de 5,3% e uma dispersão máxima a 210 °C de 28,4%. A análise de variância indica que existem diferenças significativas entre os resultados de resistência ao embutimento paralelo às fibras à 20 °C e os

resultados obtidos com as demais temperaturas, com a exceção dos valores à 40 °C, 50 °C, 70 °C, 150 °C e 170 °C.



**Figura 62:** Resistência ao embutimento paralelo às fibras.

#### 4.5.5 Resistência mecânica ao embutimento perpendicular às fibras

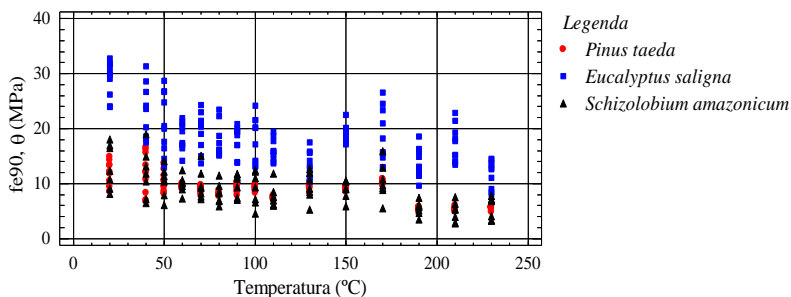
Os ensaios ao embutimento perpendicular às fibras foram realizados em três espécies de madeira: *Pinus taeda* com massa específica média aparente de 427 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 35 kg/m<sup>3</sup>; *Eucalyptus saligna*, com massa específica média aparente de 793 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 43 kg/m<sup>3</sup>; e *Schizolobium amazonicum* com massa específica média aparente de 376 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 33 kg/m<sup>3</sup>.

A **Figura 63** ilustra os resultados de resistência ao embutimento perpendicular às fibras do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum*. Para o *Pinus taeda*, foi observada uma dispersão máxima a 50 °C de 18,1% e, a 110 °C, uma dispersão mínima de 3,1%. A análise de variância indica que existem diferenças significativas entre os resultados de resistência ao embutimento paralelo às fibras a 20 °C e os resultados obtidos com as demais temperaturas, com a exceção a 40 °C.

Para o *Eucalyptus saligna*, observou-se que a menor dispersão foi de 8,1% a 150 °C e a maior foi de 26,9% a 170 °C. A análise de variância indica que existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de resistência ao embutimento perpendicular às fibras a 20 °C e as demais temperaturas.

Para o *Schizolobium amazonicum*, existe uma dispersão de 36,3% entre 20 °C e 230 °C. A análise de variância mostrou que existem diferenças significativas entre os resultados de resistência ao

embutimento paralelo às fibras a 20 °C e os resultados obtidos com as demais temperaturas, com a exceção a 40 °C, 50 °C e 170 °C.



**Figura 63:** Resistência ao embutimento perpendicular às fibras.

#### 4.6 PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA A TEMPERATURAS ELEVADAS

Nesta seção, é apresentada uma proposta da metodologia de ensaio para determinação das propriedades mecânicas da madeira sob ação da temperatura. Serão desenvolvidos os seguintes itens: a definição do tamanho da amostra; a forma e as dimensões dos corpos de prova para todas as propriedades mecânicas da madeira; o procedimento de aquecimento dos corpos de prova; os procedimentos de ensaios mecânicos; o modo da determinação da resistência mecânica; a determinação do teor de umidade dos corpos de prova; e a apresentação dos resultados.

##### 4.6.1 Amostra

O tamanho da amostra para determinação das propriedades mecânicas da madeira em cada nível de temperatura deve ser suficiente para atender a uma confiabilidade de 95%. É recomendado o uso, no mínimo, de 12 corpos de prova para cada nível de temperatura. A quantidade de corpos de prova para cada nível de temperatura foi determinada a partir de dados experimentais oriundos do trabalho de Manríquez (2008) e do presente trabalho.

Os corpos de prova devem ser associados de maneira a garantir grupos com massa específica estatisticamente homogênea para os diferentes níveis de temperatura.

### 4.6.2 Corpos de prova

Os corpos de prova devem ser isentos de defeitos e retirados de regiões afastadas das extremidades das peças de pelo menos cinco vezes a menor dimensão da secção transversal da peça considerada, mas nunca menor que 30 cm, de acordo as especificações apresentada pela NBR 7190:1997. As formas e as dimensões dos corpos, para cada propriedade estudada, são detalhadas a seguir.

#### 4.6.2.1 Corpos de prova de compressão paralela às fibras

Para os ensaios de compressão paralela às fibras, sugere-se o uso dos corpos de prova propostos pela norma NBR 7190:1997, por apresentarem as dimensões compatíveis com os equipamentos de laboratório usuais. As dimensões dos corpos de prova são apresentadas na **Figura 32**.

#### 4.6.2.2 Corpos de prova de flexão estática

Para os ensaios de flexão estática, sugere-se o uso dos corpos de prova propostos pela norma AFNOR B 51-016 (1987), por permitirem o aquecimento mais rápido e o uso de equipamentos menores. Os corpos de prova devem ter forma prismática, com secção transversal quadrada de 20 mm × 20 mm e 360 mm, na direção paralela às fibras. As dimensões dos corpos de prova seguem as especificações da norma AFNOR B 51-016 (1987), as quais são ilustradas na **Figura 35**.

#### 4.6.2.3 Corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras

Para os ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, sugere-se o uso dos corpos de prova propostos pela norma francesa AFNOR (1942) e modificados por Szücs (2004). Essa modificação permite que a ruptura dos mesmos ocorra por cisalhamento puro sem o aparecimento de concentrações de tensões. Trata-se de um corpo de prova de fácil fabricação e que garante segurança na manipulação dos dispositivos de

ensaio durante os ensaios a altas temperaturas. As dimensões são ilustradas na **Figura 38**.

#### 4.6.2.4 Corpos de prova de embutimento paralelo e perpendicular às fibras

Para os ensaios de embutimento paralelo e perpendicular às fibras, sugere-se o uso dos corpos de prova propostos pela norma AFNOR EN 383 (1993). Isso se deve à facilidade de sua fabricação e ao volume de madeira utilizada na elaboração dos mesmos. As dimensões são ilustradas nas **Figuras 41 e 44**.

#### 4.6.3 Determinação do tempo de aquecimentos dos corpos de prova

O aquecimento dos corpos de prova deve ser realizado no forno elétrico, com renovação do ar e controle automático de temperatura, com precisão de  $\pm 1$  °C. Devem ser instalados termopares no interior do equipamento, para um controle mais preciso da temperatura. O tempo de aquecimento dos corpos de prova deve ser determinado para cada propriedade mecânica estudada;

Para determinar o tempo de aquecimento dos corpos de prova devem ser seguidas as seguintes etapas:

- a) utilizar corpos de prova oriundos da amostra a ser ensaiada, com as mesmas características físicas e da mesma espécie dos corpos de prova que serão utilizados durante os ensaios mecânicos;
- b) realizar uma perfuração de aproximadamente 1,5 mm de diâmetro, cujo fundo situa-se no centro geométrico do corpo de prova;
- c) inserir um termopar tipo K na perfuração do corpo de prova;
- d) uma vez inserido o termopar, fechar completamente a perfuração com um pedaço de madeira da mesma espécie, para evitar a penetração de ar quente até o termopar;
- e) ligar o forno elétrico e certificar-se de que atingiu a temperatura de aquecimento;
- f) introduzir os corpos de prova no forno elétrico;
- g) monitorar a temperatura dos corpos de prova em intervalos de 10 minutos;

- h) o tempo de aquecimento será determinado quando os corpos de prova alcançarem o equilíbrio térmico com o interior do forno elétrico;
- i) registrar os valores de tempo de temperatura e confeccionar um gráfico de acordo com **Apêndice 5, Figuras 87 e 88**;
- j) os tempos de aquecimentos devem ser determinados para quatro níveis de temperatura: 50 °C, 100 °C, 150 °C e 200 °C.

É necessário realizar um controle preciso do tempo de aquecimento dos corpos de prova para evitar a degradação térmica excessiva dos mesmos ou a não homogeneização da temperatura.

#### 4.6.4 Procedimento de ensaio mecânico

Os ensaios mecânicos devem ser realizados numa máquina universal de ensaios. Para manter o mesmo nível de temperatura dos corpos de prova durante os ensaios mecânicos, uma câmara térmica deve ser acoplada à máquina universal de ensaios (**Figura 31**).

A velocidade de carregamento deve ser tal que se produza um deslocamento da travessa entre 1,5 e 1,8 mm/min. A célula de carga a ser utilizada deve depender principalmente de a resistência mecânica da madeira, com precisão adequada.

Os dados de força e descolamento devem ser registrados por um sistema de aquisição de dados. É aconselhável que os equipamentos de medidas (célula de carga) não sejam expostos à temperatura.

Uma vez finalizados os ensaios mecânicos, é necessário colocar os corpos de prova numa caixa fechada, para evitar que absorvam umidade do ambiente.

#### 4.6.5 Determinação da resistência mecânica

Para determinar a resistência mecânica dos corpos de prova a temperaturas elevadas, é necessário seguir os procedimentos apresentados nas seções 3.3.1 até 3.3.5.

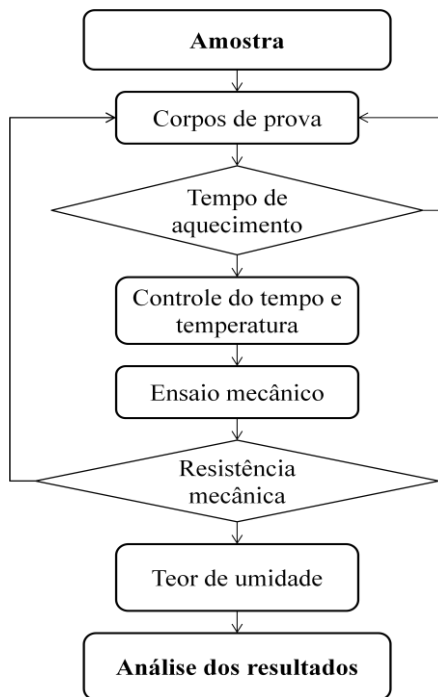


#### 4.6.6 Determinação do teor de umidade dos corpos de prova

Para determinar o teor de umidade no momento dos ensaios mecânicos, utiliza-se a metodologia descrita na seção 3.4. É recomendável utilizar os mesmos corpos de prova já ensaiados para a determinação do teor de umidade.

#### 4.6.7 Metodologia de análise dos resultados

Para a análise dos resultados deve-se seguir a metodologia apresentada na seção 3.6. A **Figura 64** apresenta o fluxograma geral na determinação das propriedades mecânicas da madeira a temperaturas elevadas.



**Figura 64:** Metodologia de ensaios mecânicos a temperaturas elevadas.

#### 4.7 VALORES MÉDIOS E CARACTERÍSTICOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MADEIRA

A **Tabela 29** apresenta os valores médios e os característicos de resistência mecânica das espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum* à temperatura ambiente.

**Tabela 29:** Valores médios e valores característicos da resistência mecânica à temperatura ambiente.

Propriedades Mecânicas	Resistência média (MPa)			Resistência característica (MPa)		
	<i>Pinus taeda</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>	<i>Pinus taeda</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>	<i>Schizolobium amazonicum</i>
$f_{c0,20^{\circ}\text{C}}$	24,3	51,1	32,3	20,4	43,0	24,9
$f_{m,20^{\circ}\text{C}}$	60,3	72,1	-----	46,7	62,5	-----
$f_{v,20^{\circ}\text{C}}$	4,5	7,9	2,9	3,0	6,3	2,2
$f_{e0,20^{\circ}\text{C}}$	26,8	64,7	24,5	19,5	50,8	20,7
$f_{e90,20^{\circ}\text{C}}$	12,0	29,0	13,1	8,3	23,1	5,4

Constatou-se que o *Pinus taeda* apresenta a menor resistência média à compressão paralela e ao embutimento perpendicular às fibras entre as três espécies estudadas, enquanto o *Eucalyptus saligna* apresenta a maior resistência média entre, devido, provavelmente, ao fato de esta espécie apresentar maior massa específica. Destaca-se a resistência média do *Schizolobium amazonicum*. Embora apresente uma massa específica menor entre as três espécies, sua resistência mecânica pode ser considerada alta.

#### 4.8 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE AS RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS NORMALIZADAS

Nesta seção, são apresentados os valores característicos normalizados das resistências do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum* para os diferentes níveis de temperatura.

Os valores característicos de cada uma das propriedades estudadas são apresentados em detalhe no **Apêndice 4**.

#### 4.8.1 Resistências características à compressão paralela às fibras normalizadas

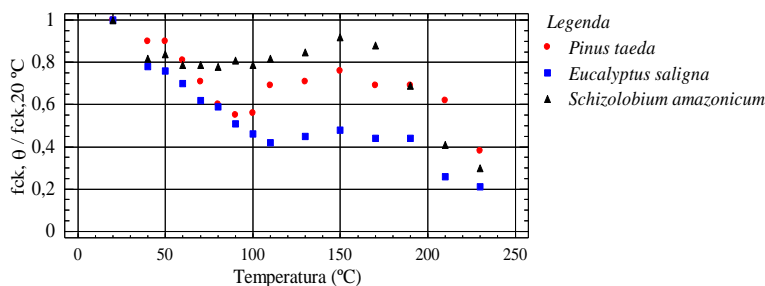
A **Figura 65** apresenta os valores característicos normalizados à compressão paralela às fibras do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum* entre 20 °C e 230 °C. Observou-se que, para as três espécies estudadas, existem variações não lineares da resistência normalizada, em função da temperatura. Porém, há um trecho linear a baixas temperaturas. Observa-se que o maior trecho linear ocorre para a amostra de *Eucalyptus saligna* entre 20 °C e 110 °C. Para o *Pinus taeda*, a redução máxima relativa é de 47% a 60 °C. Já para o *Eucalyptus saligna*, a redução é de 58% aos 110 °C. Para o *Schizolobium amazonicum*, experimenta uma redução de 20% entre 20 °C e 100 °C, depois ocorre a redução relativa máxima de 8% a 150 °C.

A 230 °C, a redução máxima para o *Pinus taeda* é de 62%; já para o *Eucalyptus saligna*, é de 79%, e para o *Schizolobium amazonicum* é de 70%. Nota-se que o *Eucalyptus saligna* é a espécie mais sensível ao efeito da temperatura, entre as três madeiras estudadas.

Durante o aquecimento das amostras de *Eucalyptus saligna*, foram observadas fendas profundas nas faces de todos os corpos de prova. Segundo Chafe (1979), a redução da resistência mecânica na madeira é devida à formação de fendas internas durante o aquecimento a altas temperaturas.

Foi constatada, nas três espécies ensaiadas, a diminuição da resistência mecânica em torno de 70 °C e de 80 °C. Esta diminuição pode estar relacionada à transição vítrea da lignina. É fato conhecido que a transição vítrea da lignina está vinculada à temperatura e ao teor de umidade. Irvine (1984) indica que a transição vítrea da lignina de diversas espécies de madeira ocorre em um espectro de temperatura entre 60 °C e 90 °C, com teor de umidade de 20 %. Para um teor de umidade entre 5% e 6%, a transição vítrea da lignina da espécie *Eucalyptus regnans* situa-se perto de 70 °C e para o *Pinus radiata* situa-se entre 70 °C e 80 °C (**Figura 16**). Olsson e Salmen (1997) observaram que a transição vítrea para a espécie *Ulmus americana* ocorre a 78 °C e para o *Pinus strobus* ocorre a 90 °C. Na atual pesquisa, a perda de resistência foi observada a 80 °C, com um valor médio de teor de

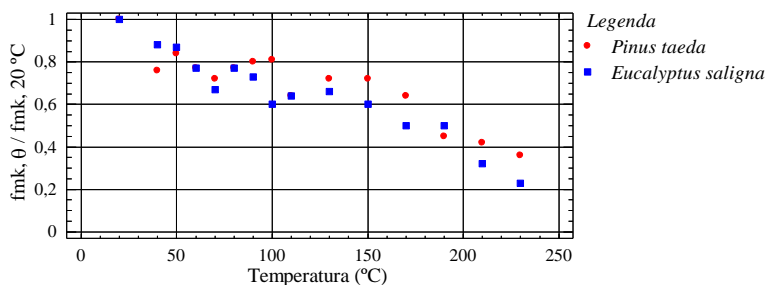
umidade de 7,24%, 7,34% e 6,79%, para o *Pinus taeda*, para o *Eucalyptus saligna* e para o *Schizolobium amazonicum*, respectivamente (Apêndice 1).



**Figura 65:** Resistências características à compressão paralela às fibras normalizadas.

#### 4.8.2 Resistências características à flexão estática normalizadas

A **Figura 66** apresenta os valores característicos normalizados à flexão estática do *Pinus taeda* e do *Eucalyptus saligna* entre 20 °C e 230 °C. Observou-se que, para o *Eucalyptus saligna*, a 80 °C, existe redução mínima relativa de 23 % e uma redução máxima relativa a 100 °C de 40 %. Já para o *Pinus taeda* esta redução máxima relativa foi de 28% a 70 °C e mínima relativa de 19% a 100 °C. Foi constatado um comportamento linear para as duas espécies entre 150 °C e 230 °C. A 230 °C, a redução máxima da resistência à flexão é de 64% e 77% para o *Pinus taeda* e para o *Eucalyptus saligna*, respectivamente. Percebe-se, novamente, que o *Eucalyptus saligna* é a espécie mais sensível aos efeitos da temperatura na resistência à flexão.

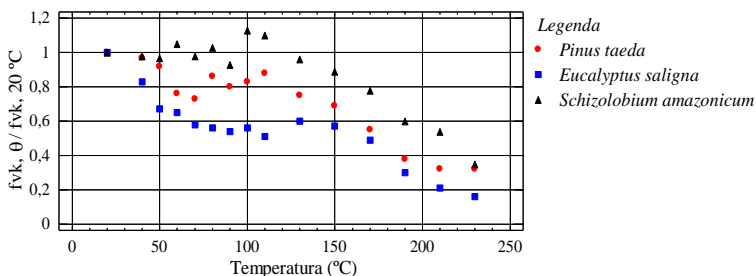


**Figura 66:** Resistências características à flexão estática normalizadas.

#### 4.8.3 Resistências características ao cisalhamento paralelo às fibras normalizadas

A **Figura 67** apresenta os valores característicos normalizados ao cisalhamento paralelo às fibras do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum*. Observou-se que para as três espécies estudadas existem comportamentos diferentes da resistência normalizada em função da temperatura.

Entre 20 °C e 90 °C, a espécie *Schizolobium amazonicum* apresenta um comportamento constante, com valor característico normalizado igual a 1,0, indicando que, nessa faixa de temperatura, a resistência ao cisalhamento não é afetada pela variação da temperatura. A 100 °C existe um aumento de resistência. Acima dessa temperatura, a resistência diminui linearmente com o aumento da temperatura alcançando uma redução máxima de 75% a 230 °C.



**Figura 67:** Resistências características ao cisalhamento paralelo às fibras normalizadas.

Para o *Pinus taeda*, foi observada uma redução máxima relativa de 27% a 70 °C. A partir de 110 °C, apresenta um comportamento linear, até uma redução máxima de 68% a 230 °C. Para o *Eucalyptus saligna*, foi observada uma redução relativa de 33% a 70 °C. Acima dessa temperatura, houve um leve aumento da resistência até 150 °C. Entre 150 °C e 230 °C, o comportamento é aproximadamente linear, com uma redução mínima de 84% a 230 °C.

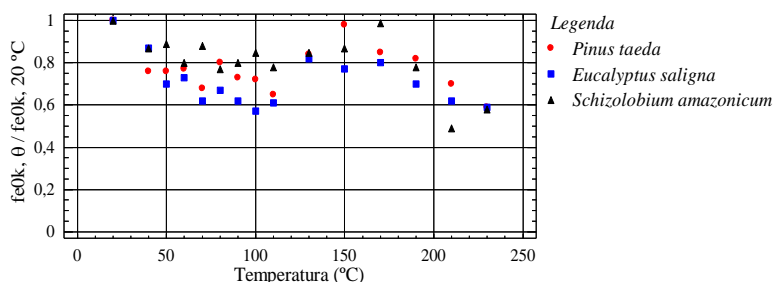
As diferenças de comportamento entre o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus saligna* podem ser devidas às diferenças anatômicas entre existentes resinosas e folhosas e também entre a lignina que está na lamela média e na parede celular (YANG; GORING, 1890) (**Tabela 2**).

Segundo Ifju (1964), a lignina é o polímero responsável pela resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

Observou-se que entre 70 °C e 130 °C, ocorre uma forte redução da resistência do *Eucalyptus saligna*, a qual pode ser devida à transição vítrea da lignina. Sabe-se que este polímero apresenta transição vítrea em sua estrutura entre 100 °C e 130 °C (KOŠÍKOVÁ et al., 1999; WESTERMARK et al., 1995; KACÍK et al., 1999); entre 130 °C e 200 °C, ocorre a transição vítrea da lignina em estado seco para várias espécies de madeira (SALMEN, 1982); entre 150 °C e 300 °C, ocorre degradação térmica significativa da lignina (MANGALAM, 2005). Novamente foi observado que o *Eucalyptus saligna* é a espécie que mais é afetada pela temperatura, seguida pelo *Pinus taeda* e pelo *Schizolobium amazonicum*.

#### 4.8.4 Resistências características ao embutimento paralelo às fibras normalizadas

A **Figura 68** apresenta os valores característicos normalizados ao embutimento paralelo às fibras do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum* entre 20 °C e 230 °C. Para o *Eucalyptus saligna*, foi observado um comportamento quase linear entre 20 °C e 90 °C. Constatou-se a maior redução relativa de 43%, a 100 °C e a menor redução relativa de 22%, a 150 °C. Para o *Pinus taeda*, a redução máxima relativa de 37%, ocorre a 110 °C e a redução mínima relativa de 2%, a 150 °C. Para o *Schizolobium amazonicum*, observou-se a 170 °C uma redução mínima relativa de 1%. Constatou-se que, a 230 °C, as três espécies obtiverem uma redução máxima de 41%.

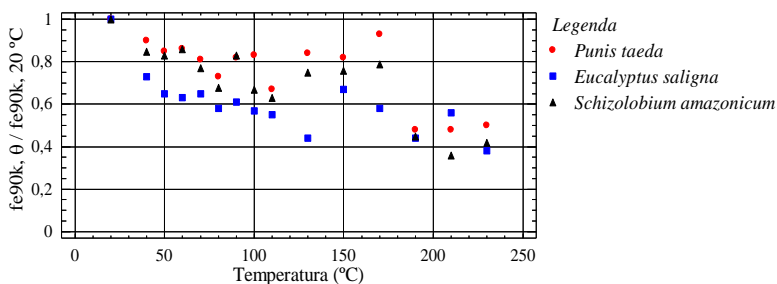


**Figura 68:** Resistências características ao embutimento paralelo às fibras normalizadas.

Os valores característicos das três amostras apresentam um comportamento quase similar. Pode-se dizer que a redução da resistência ao embutimento paralelo às fibras pode ser independente da espécie ensaiada.

#### 4.8.5 Resistências características ao embutimento perpendicular às fibras normalizadas

A **Figura 69** apresenta os valores característicos normalizados ao embutimento perpendicular às fibras do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum* entre 20 °C e 230 °C. Foi observado que o *Eucalyptus saligna* apresenta um comportamento quase linear, entre 20 °C e 80 °C. A 130 °C apresenta uma redução maior de 56% e uma redução menor a 150 °C, de 33%. Já o *Pinus taeda* apresenta a 110 °C, redução máxima relativa de 33% e uma redução mínima a 170 °C de 5%.



**Figura 69:** Resistências características ao embutimento perpendicular às fibras normalizadas.

Para o *Schizolobium amazonicum*, observou-se uma redução máxima de 39%, a 110 °C e, a 60 °C, uma redução mínima de 17%. A 230 °C, foi constatada uma redução de 50%, 58% e 62% para o *Pinus taeda*, para o *Schizolobium amazonicum* e para o *Eucalyptus saligna*, respectivamente.

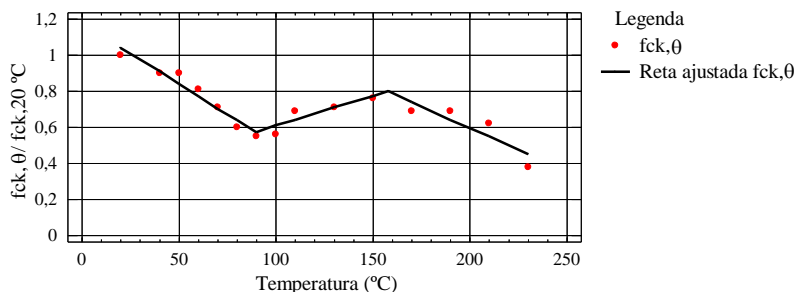
Neste ensaio, novamente verificou-se que o *Eucalyptus saligna* é a espécie que mais é afetada pela temperatura em quase todos os níveis de temperatura.

#### 4.9 AJUSTE DAS RESISTÊNCIAS CARACTERÍSTICAS NORMALIZADAS

Nesta seção são apresentadas expressões dos valores característicos, em função da temperatura, para as resistências da madeira. Essas foram determinadas a partir dos valores de resistência mecânica apresentados na seção 4.5. A partir deles, foram determinados seus respectivos valores característicos, de acordo a metodologia apresentada na seção 3.5. Os valores característicos obtidos para cada propriedade são apresentados em detalhe no **Apêndice 4**.

##### 4.9.1 Resistência característica à compressão paralela às fibras

A **Figura 70** apresenta as retas que melhor se ajustam às resistências características à compressão paralela às fibras do *Pinus taeda*. Observou-se que a resistência característica normalizada à compressão diminui com o aumento da temperatura.



**Figura 70:** Resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Pinus taeda*.

Foi constatada a existência de um valor característico mínimo, relativo a 90 °C de 0,57. Entre 90 °C e 160 °C, ocorre um valor máximo relativo a 160 °C, de 0,80. Em temperaturas maiores, a resistência diminui até um valor mínimo de 0,45, a 230 °C.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Pinus taeda*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (20), (21) e (22) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão



paralela às fibras do *Pinus taeda*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck,20^\circ\text{C}}} = 1,18 - 6,76 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 90^\circ\text{C} \quad (20)$$

$$r^2 = 0,97$$

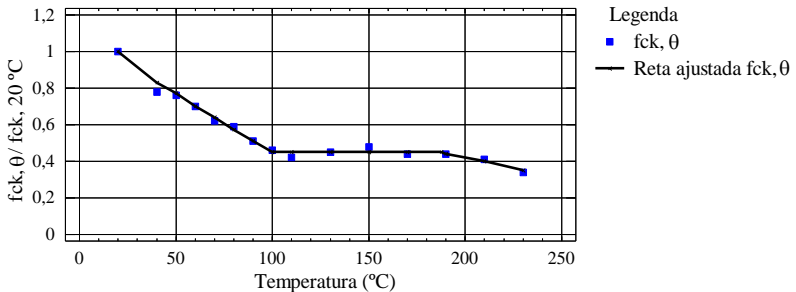
$$\frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck,20^\circ\text{C}}} = 0,27 + 3,32 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 90 - 158^\circ\text{C} \quad (21)$$

$$r^2 = 0,92$$

$$\frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck,20^\circ\text{C}}} = 1,57 - 4,87 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 158 - 230^\circ\text{C} \quad (22)$$

$$r^2 = 0,87$$

A **Figura 71** apresenta os resultados de resistência característica à compressão paralela às fibras do *Eucalyptus saligna* e normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente. Observou-se que a resistência característica normalizada apresenta um comportamento linear até 100 °C, com valor característico normalizado de 0,45. Este valor característico se mantém até 170 °C. A 230 °C, o valor característico é mínimo, de 0,38.



**Figura 71:** Resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Eucalyptus saligna*.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Eucalyptus saligna*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura.

As Equações (23), (24) e (25) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Eucalyptus saligna*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,08 - 6,30 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 100\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (23)$$

$$r^2 = 0,98$$

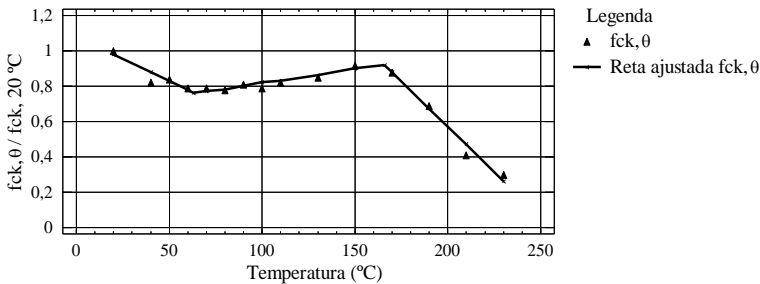
$$\frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 0,45, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 100 - 185\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (24)$$

$$r^2 = 0,86$$

$$\frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 0,91 - 2,42 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 185 - 230\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (25)$$

$$r^2 = 0,97$$

A **Figura 72** apresenta os resultados de resistência característica à compressão paralela às fibras do *Schizolobium amazonicum* e normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente. Foi constatado que a resistência característica normalizada apresenta um comportamento linear até 60 °C, com valor característico normalizado mínimo relativo de 0,78. Em seguida, há um aumento do valor característico até 170 °C, com um máximo relativo de 0,88. A 230 °C, o valor característico é mínimo, de 0,30.



**Figura 72:** Resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Schizolobium amazonicum*.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Schizolobium amazonicum*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (26), (27) e (28) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Schizolobium amazonicum*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,08 - 4,93 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 64\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (26)$$

$$r^2 = 0,91$$

$$\frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 0,66 + 1,60 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 64 - 166\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (27)$$

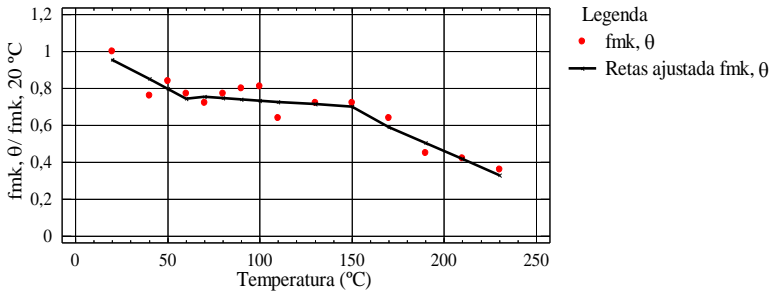
$$r^2 = 0,92$$

$$\frac{f_{ck,\theta}}{f_{ck,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 2,61 - 1,02 \cdot 10^{-2} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 166 - 230\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (28)$$

$$r^2 = 0,98$$

#### 4.9.2 Resistência característica à flexão estática

A **Figura 73** apresenta os resultados de resistência característica à flexão estática do *Pinus taeda* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente. Observou-se que os valores característicos normalizados encontrados apresentam um comportamento não linear que diminui com o aumento da temperatura.



**Figura 73:** Resistência característica normalizada à flexão estática do *Pinus taeda*.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Pinus taeda*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (29), (30) e (31) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Pinus taeda*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{mk, \theta}}{f_{mk, 20^\circ C}} = 1,06 - 4,99 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 80^\circ C \quad (29)$$

$$r^2 = 0,79$$

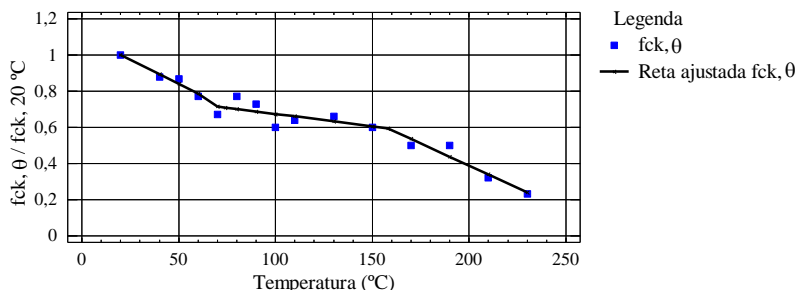
$$\frac{f_{mk, \theta}}{f_{mk, 20^\circ C}} = 0,87 - 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 80 - 150^\circ C \quad (30)$$

$$r^2 = 0,46$$

$$\frac{f_{mk, \theta}}{f_{mk, 20^\circ C}} = 1,32 - 4,27 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 150 - 230^\circ C \quad (31)$$

$$r^2 = 0,93$$

A **Figura 74** apresenta os resultados de resistência característica à flexão estática do *Eucalyptus saligna* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente.



**Figura 74:** Resistência característica normalizada à flexão estática do *Eucalyptus saligna*.

Observou-se que a resistência característica normalizada diminui com a temperatura de ensaio. A 150 °C, obteve-se um valor mínimo relativo de 0,61. A 230 °C, a resistência característica normalizada é 0,24.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Eucalyptus saligna*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (32), (33) e (34) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Eucalyptus saligna*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$f_{mk,\theta} / f_{mk,20\text{ °C}} = 1,1 - 5,37 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 70\text{ °C} \quad (32)$$

$$r^2 = 0,94$$

$$f_{mk,\theta} / f_{mk,20\text{ °C}} = 0,81 - 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 70 - 150\text{ °C} \quad (33)$$

$$r^2 = 0,61$$

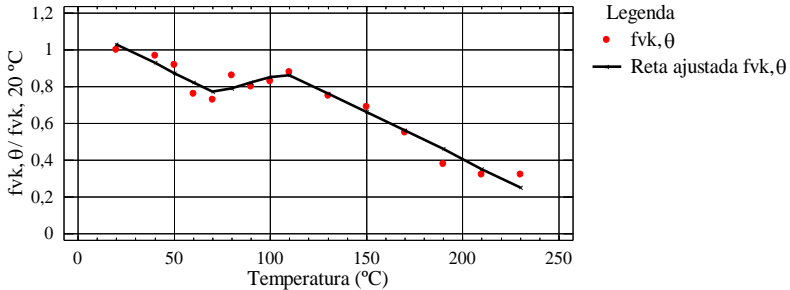
$$f_{mk,\theta} / f_{mk,20\text{ °C}} = 1,38 - 4,95 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 150 - 230\text{ °C} \quad (34)$$

$$r^2 = 0,95$$

#### 4.9.3 Valores característicos ao cisalhamento paralelo às fibras

A **Figura 75** apresenta os resultados de resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras do *Pinus taeda* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente. Observou-se que a resistência característica normalizada diminui com o aumento da temperatura.

A 70 °C, obteve-se um valor mínimo relativo de 0,77, e um máximo relativo de 0,86 a 110 °C. A 230 °C, o valor característico normalizado é 0,25.



**Figura 75:** Resistência característica normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras do *Pinus taeda*.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Pinus taeda*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (35), (36) e (37) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Pinus taeda*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$f_{vk,\theta} / f_{vk,20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1,14 - 5,34 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 70\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (35)$$

$$r^2 = 0,92$$

$$f_{vk,\theta} / f_{vk,20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0,58 + 2,56 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 70 - 110\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (36)$$

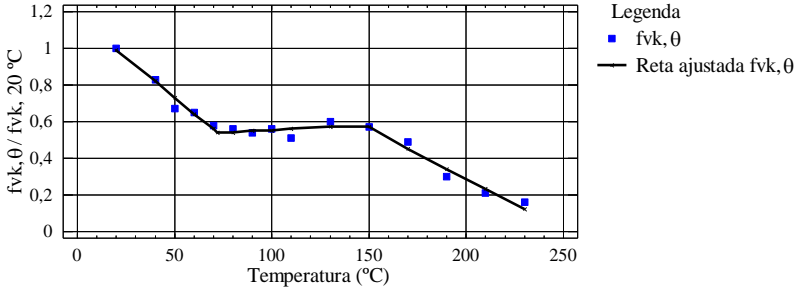
$$r^2 = 0,33$$

$$f_{vk,\theta} / f_{vk,20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1,42 - 5,08 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 110 - 230\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (37)$$

$$r^2 = 0,96$$

A **Figura 76** apresenta os resultados de resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras do *Eucalyptus saligna* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente.

Observou-se que, entre 70 °C e 150 °C, o comportamento dos valores característico é quase constante, com exceção a 110 °C. Entre 150 e 230 °C, a resistência característica diminui até um valor mínimo característico relativo de 0,12.



**Figura 76:** Resistência característica normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras do *Eucalyptus saligna*.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Eucalyptus saligna*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (38), (39) e (40) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Eucalyptus saligna*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{vk,\theta}}{f_{vk,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,16 - 8,59 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 70\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (38)$$

$$r^2 = 0,98$$

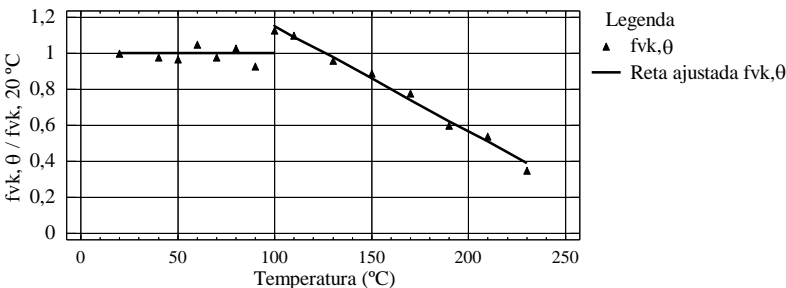
$$\frac{f_{vk,\theta}}{f_{vk,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 0,51 + 4,37 \cdot 10^{-4} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 70 - 150\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (39)$$

$$r^2 = 0,41$$

$$\frac{f_{vk,\theta}}{f_{vk,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,38 - 5,48 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 150 - 230\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (40)$$

$$r^2 = 0,96$$

A **Figura 77** apresenta os resultados de resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras do *Schizolobium amazonicum* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente.



**Figura 77:** Resistência característica normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras do *Schizolobium amazonicum*.

Observou-se que entre 20 °C e 90 °C, o valor característico médio é constante e igual a 1,0. Entre 90 °C e 100 °C, ocorre uma interrupção da reta dos valores ajustados do fator de redução, este passando para um valor maior. A partir de 100 °C, a resistência normalizada apresenta um comportamento linear até 230 °C, com um fator de redução 0,39.

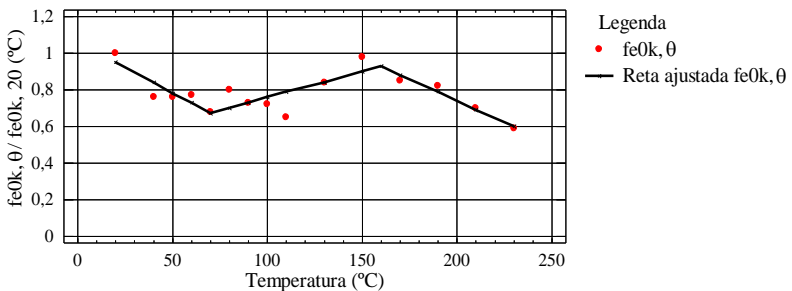
Devido ao comportamento dos valores característicos do *Schizolobium amazonicum*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (41) e (42) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Schizolobium amazonicum*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\begin{aligned} f_{vk,\theta} / f_{vk,20^\circ\text{C}} &= 1,0, \\ r^2 &= 1 \end{aligned} \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 100^\circ\text{C} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} f_{vk,\theta} / f_{vk,20^\circ\text{C}} &= 1,74 - 5,87 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \\ r^2 &= 0,99 \end{aligned} \quad \text{para } \theta \text{ entre } 100 - 230^\circ\text{C} \quad (42)$$

#### 4.9.4 Resistência característica ao embutimento paralelo às fibras

A **Figura 78** apresenta os resultados de resistência característica ao embutimento paralelo às fibras do *Pinus taeda* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente.



**Figura 78:** Resistência característica normalizada ao embutimento paralelo às fibras do *Pinus taeda*.

Foi observado um comportamento não linear dos valores característicos ao embutimento paralelo em função da temperatura, existindo um ponto de máximo relativo de 0,98.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Pinus taeda*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (43), (44) e (45) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Pinus taeda*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{e0k,\theta}}{f_{e0k,20^\circ\text{C}}} = 1,06 - 5,60 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 70^\circ\text{C} \quad (43)$$

$$r^2 = 0,9$$

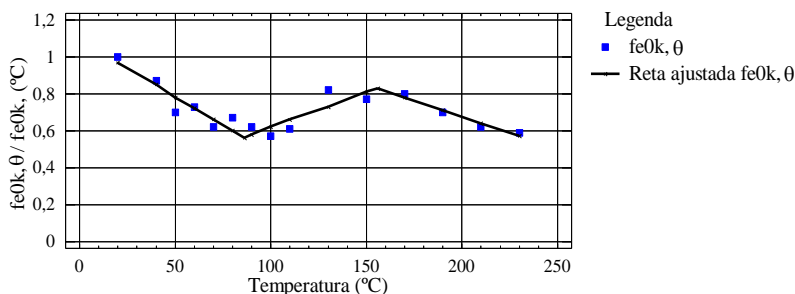
$$\frac{f_{e0k,\theta}}{f_{e0k,20^\circ\text{C}}} = 0,46 + 2,90 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 70 - 150^\circ\text{C} \quad (44)$$

$$r^2 = 0,38$$

$$\frac{f_{e0k,\theta}}{f_{e0k,20^\circ\text{C}}} = 1,66 - 4,62 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 150 - 230^\circ\text{C} \quad (45)$$

$$r^2 = 0,98$$

A **Figura 79** apresenta os resultados de resistência característica ao embutimento paralelo às fibras do *Eucalyptus saligna* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente. Foi constatado um comportamento não linear dos valores característicos ao embutimento paralelo, entre 20 °C e 230 °C. A 90 °C, obteve-se um mínimo relativo de 0,54 e um máximo relativo de 0,81 a 150 °C. A 230 °C, o valor característico é de 0,57.



**Figura 79:** Resistência característica normalizada ao embutimento paralelo às fibras do *Eucalyptus saligna*.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Eucalyptus saligna*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (46), (47) e (48) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Eucalyptus saligna*, com seus respectivos coeficientes de correlação.



$$\frac{f_{e0k,\theta}}{f_{e0k,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,09 - 6,10 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 90\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (46)$$

$$r^2 = 0,92$$

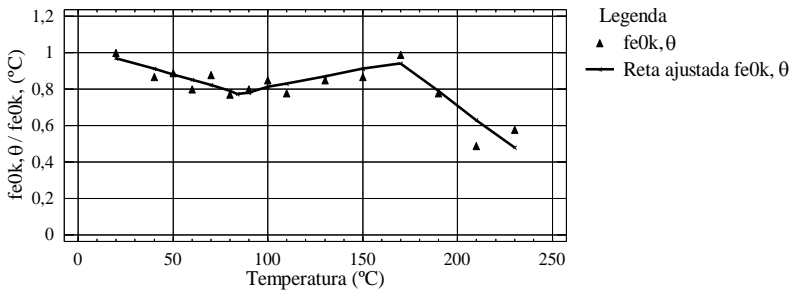
$$\frac{f_{e0k,\theta}}{f_{e0k,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 0,23 + 3,84 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 90 - 150\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (47)$$

$$r^2 = 0,85$$

$$\frac{f_{e0k,\theta}}{f_{e0k,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,37 - 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 150 - 230\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (48)$$

$$r^2 = 0,96$$

A **Figura 80** ilustra os resultados de resistência característica ao embutimento paralelo às fibras do *Schizolobium amazonicum* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente. Os valores característicos normalizados encontrados apresentam um comportamento não linear. Observou-se que, a 90 °C, obteve-se um mínimo relativo de 0,77 e um máximo relativo de 0,94, a 170 °C. A 230 °C, o valor característico alcançou um valor mínimo de 0,47.



**Figura 80:** Resistência característica normalizada ao embutimento paralelo às fibras do *Schizolobium amazonicum*.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Schizolobium amazonicum*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (49), (50) e (51) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Schizolobium amazonicum*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{e0k,\theta}}{f_{e0k,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,03 - 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 80\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (49)$$

$$r^2 = 0,85$$

$$\frac{f_{e0k,\theta}}{f_{e0k,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 0,59 + 2,0 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 80 - 150\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (50)$$

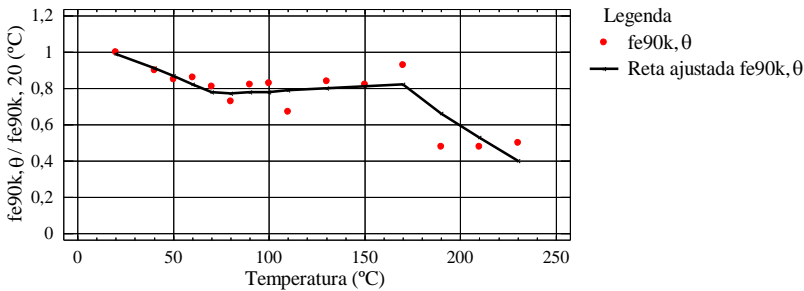
$$r^2 = 0,66$$

$$\frac{f_{e0k,\theta}}{f_{e0k,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 2,25 - 7,73 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 150 - 230\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (51)$$

$$r^2 = 0,88$$

#### 4.9.5 Resistência característica ao embutimento perpendicular às fibras

A **Figura 81** apresenta os resultados de resistência característica ao embutimento perpendicular às fibras do *Pinus taeda* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente. Observou-se um comportamento linear entre 20 °C e 70 °C, com um mínimo relativo de 0,77. Entre 70 °C e 170 °C, o comportamento dos valores característico é quase constante com um máximo relativo de 0,82 a 170 °C.



**Figura 81:** Resistência característica normalizada ao embutimento perpendicular às fibras do *Pinus taeda*.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Pinus taeda*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (52), (53) e (54) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Pinus taeda*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{e90k, \theta}}{f_{e90k, 20^\circ C}} = 1,07 - 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 70^\circ C \quad (52)$$

$r^2 = 0,96$

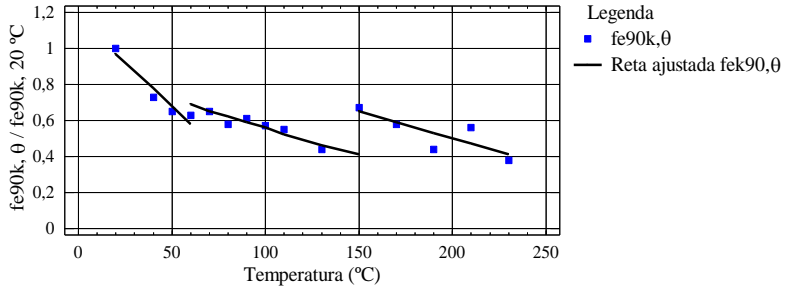
$$\frac{f_{e90k, \theta}}{f_{e90k, 20^\circ C}} = 0,73 + 5,12 \cdot 10^{-4} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 70 - 170^\circ C \quad (53)$$

$r^2 = 0,64$

$$\frac{f_{e90k, \theta}}{f_{e90k, 20^\circ C}} = 1,9 - 6,48 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 170 - 230^\circ C \quad (54)$$

$r^2 = 0,87$

A **Figura 82** apresenta os resultados de resistência ao embutimento perpendicular às fibras do *Eucalyptus saligna* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente.



**Figura 82:** Resistência característica normalizada ao embutimento perpendicular às fibras do *Eucalyptus saligna*.

Entre 60 e 70 °C, ocorre uma interrupção na reta ajustada dos valores característicos, esta passando para um valor maior. O mesmo ocorre entre 130 °C e 150 °C. Devido ao comportamento dos valores característicos do *Eucalyptus saligna*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (55), (56) e (57) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Eucalyptus saligna*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{e90k, \theta}}{f_{e90k, 20^\circ C}} = 1,16 - 9,64 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 60^\circ C \quad (55)$$

$$r^2 = 0,90$$

$$\frac{f_{e90k, \theta}}{f_{e90k, 20^\circ C}} = 0,86 - 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 60 - 150^\circ C \quad (56)$$

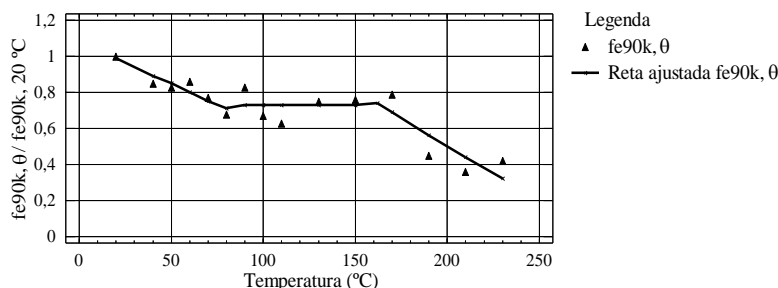
$$r^2 = 0,90$$

$$\frac{f_{e90k, \theta}}{f_{e90k, 20^\circ C}} = 1,09 - 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 150 - 230^\circ C \quad (57)$$

$$r^2 = 0,82$$

A **Figura 83** ilustra os resultados de resistência ao embutimento característico perpendicular às fibras do *Schizolobium amazonicum* normalizados em relação aos valores obtidos à temperatura ambiente.

Os valores característicos normalizados encontrados apresentam um comportamento não linear. Este comportamento pode ser dividido em três fases. Uma entre 20 °C e 80 °C, a outra entre 80 °C e 150 °C e, finalmente, entre 150 °C e 230 °C.



**Figura 83:** Resistência característica normalizada ao embutimento perpendicular às fibras do *Schizolobium amazonicum*.

Devido ao comportamento dos valores característicos do *Schizolobium amazonicum*, foram propostas três equações para os fatores de redução em função da temperatura. As Equações (58), (59) e (60) representam o melhor ajuste à resistência característica normalizada à compressão paralela às fibras do *Schizolobium amazonicum*, com seus respectivos coeficientes de correlação.

$$\frac{f_{e90k,\theta}}{f_{e90k,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,08 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 20 - 80\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (58)$$

$$r^2 = 0,94$$

$$\frac{f_{e90k,\theta}}{f_{e90k,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 0,71 + 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 80 - 150\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (59)$$

$$r^2 = 0,40$$

$$\frac{f_{e90k,\theta}}{f_{e90k,20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = 1,71 - 6,06 \cdot 10^{-3} \cdot \theta, \quad \text{para } \theta \text{ entre } 150 - 230\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (60)$$

$$r^2 = 0,80$$

#### 4.10 COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Nesta seção serão apresentados os coeficientes de modificação em função da temperatura das resistências à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras e à flexão estática, entre 20 °C e 230 °C, para as espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum*.

Os coeficientes de modificação, representados a partir deste momento por  $k$ , são apresentados na **Tabela 30**. Eles foram determinados a partir das equações ajustadas, apresentadas na seção 4.9, e pertencem à melhor reta, com o melhor ajuste aos valores de resistências características normalizadas, obtidas experimentalmente para cada uma das propriedades estudadas.

A partir deste momento, a nomenclatura adotada para os coeficientes de modificação será dada pela letra  $k_{w,\theta}$  seguida por dois índices. O primeiro indica a resistência considerada ( $w$ ), e o segundo indica a temperatura ( $\theta$ ), para o qual ele é válido. Assim, o coeficiente de modificação da resistência à compressão paralela às fibras a 60 °C é expresso por  $k_{c0,60}$ , por exemplo.

Os coeficientes de modificação propostos nesta pesquisa foram obtidos a partir de ensaios mecânicos realizados em corpos de prova de dimensões pequenas. As dimensões foram especificadas pelas diferentes normas utilizadas, porém, é necessário realizar ensaios mecânicos de elementos estruturais à escala real, para validar os resultados obtidos.

**Tabela 30:** Coeficientes de modificação ajustados.

Temperatura (°C)	Compressão			Flexão		Cisalhamento			Embutimento paralelo			Embutimento perpendicular		
	<i>Pt</i>	<i>Es</i>	<i>Sa</i>	<i>Pt</i>	<i>Es</i>	<i>Pt</i>	<i>Es</i>	<i>Sa</i>	<i>Pt</i>	<i>Es</i>	<i>Sa</i>	<i>Pt</i>	<i>Es</i>	<i>Sa</i>
	$k_{\theta c}$	$k_{\theta c}$	$k_{\theta c}$	$k_{\theta m}$	$k_{\theta m}$	$k_{\theta v}$	$k_{\theta v}$	$k_{\theta v}$	$k_{\theta e0}$	$k_{\theta e0}$	$k_{\theta e0}$	$k_{\theta e90}$	$k_{\theta e90}$	$k_{\theta e90}$
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
40	0,91	0,83	0,88	0,86	0,89	0,93	0,82	0,99	0,84	0,85	0,91	0,91	0,77	0,88
50	0,84	0,77	0,83	0,81	0,84	0,87	0,73	0,99	0,78	0,79	0,88	0,87	0,68	0,83
60	0,77	0,70	0,78	0,76	0,80	0,82	0,64	0,99	0,72	0,72	0,85	0,82	0,58	0,78
70	0,70	0,64	0,77	0,71	0,69	0,77	0,56	0,99	0,67	0,66	0,82	0,78	0,49	0,73
80	0,64	0,58	0,78	0,66	0,68	0,78	0,54	0,99	0,69	0,60	0,79	0,77	0,58	0,68
90	0,57	0,51	0,80	0,77	0,67	0,81	0,55	0,99	0,72	0,54	0,77	0,78	0,59	0,72
100	0,61	0,45	0,82	0,75	0,66	0,84	0,55	1,15	0,75	0,61	0,79	0,78	0,56	0,72
110	0,64	0,45	0,83	0,74	0,65	0,86	0,56	1,09	0,78	0,65	0,81	0,79	0,52	0,72
130	0,70	0,45	0,86	0,72	0,63	0,76	0,56	0,98	0,84	0,73	0,85	0,80	0,46	0,73
150	0,77	0,45	0,90	0,68	0,61	0,66	0,57	0,86	0,90	0,81	0,89	0,81	0,64	0,73
170	0,74	0,45	0,88	0,59	0,52	0,56	0,45	0,74	0,87	0,78	0,94	0,82	0,58	0,68
190	0,64	0,41	0,67	0,51	0,42	0,45	0,34	0,62	0,78	0,71	0,78	0,66	0,52	0,56
210	0,55	0,30	0,47	0,42	0,33	0,35	0,23	0,51	0,69	0,64	0,63	0,53	0,46	0,44
230	0,45	0,19	0,26	0,34	0,24	0,25	0,12	0,39	0,60	0,57	0,47	0,40	0,40	0,32

*Pt: Pinus taeda*

*Es: Eucalyptus saligna*

*Sa: Schizolobium amazonicum*

 : Menores coeficientes de modificação entre todas as resistências para uma faixa ou valor de temperatura.

#### 4.10.1 Coeficientes de modificação por propriedade da madeira

A **Tabela 31** apresenta os coeficientes de modificação à compressão paralela às fibras para o *Pinus taeda*, para o *Eucalyptus saligna* e para o *Schizolobium amazonicum*. Observou-se que os menores coeficientes de modificação à compressão paralela às fibras para as três espécies correspondem aos coeficientes de modificação da espécie *Eucalyptus saligna*.

**Tabela 31:** Coeficientes de modificação à compressão paralela às fibras.

Temperatura (°C)	Coeficiente de modificação ( $k_{c,\theta}$ )
20	1,00
40	0,83
50	0,77
60	0,70
70	0,64
80	0,58
90	0,51
100	0,45
110	0,45
130	0,45
150	0,45
170	0,45
190	0,41
210	0,30
230	0,19

As **Tabelas 32 e 33** apresentam os menores valores encontrados para os coeficientes de modificação à flexão estática e ao cisalhamento paralelo às fibras, respectivamente. Os coeficientes de modificação para a resistência à flexão estática entre 40 °C e 60 °C, bem como a 80 °C, são oriundos da espécie *Pinus taeda*. A 70 °C e no intervalo de 90 °C a 230 °C, por sua vez, os coeficientes de modificação correspondem aos da espécie *Eucalyptus saligna*.

Os coeficientes de modificação para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, para todos os níveis de temperatura, correspondem aos da espécie *Eucalyptus saligna*.

**Tabela 32:** Coeficientes de modificação à flexão estática.

Temperatura (°C)	Coeficiente de modificação ( $k_{m,\theta}$ )
20	1,00
40	0,86
50	0,81
60	0,76
70	0,69
80	0,66
90	0,67
100	0,66
110	0,65
130	0,63
150	0,61
170	0,52
190	0,42
210	0,33
230	0,24

**Tabela 33:** Coeficientes de modificação ao cisalhamento paralelo às fibras.

Temperatura (°C)	Coeficiente de modificação ( $k_{v,\theta}$ )
20	1,00
40	0,82
50	0,73
60	0,64
70	0,56
80	0,54
90	0,55
100	0,55
110	0,56
130	0,56
150	0,57
170	0,45
190	0,34
210	0,23
230	0,12

As **Tabelas 34a e 34b** apresentam os menores valores encontrados para os coeficientes de modificação ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras. Entre 40 °C e 60 °C, os coeficientes de modificação são provenientes dos ensaios com a espécie *Pinus taeda*. Entre 70 °C e 190 °C, os coeficientes de modificação são oriundos dos ensaios com a espécie *Eucalyptus saligna*. Já entre 210 °C e 230 °C, os coeficientes de modificação correspondem à espécie *Schizolobium amazonicum*.

Para a resistência ao embutimento perpendicular às fibras, entre 20 °C e 190 °C, os coeficientes de modificação são provenientes dos ensaios com a espécie *Eucalyptus saligna*. Já entre 210 °C e 230 °C, os coeficientes de modificação correspondem à espécie *Schizolobium amazonicum*.



**Tabela 34:** Coeficientes de modificação ao embutimento

(a) Embutimento paralelo às fibras.      (b) Embutimento perpendicular às fibras.

Temperatura (°C)	Coeficientes de modificação ( $k_{e0,0}$ )
20	1,00
40	0,84
50	0,78
60	0,72
70	0,66
80	0,60
90	0,54
100	0,61
110	0,65
130	0,73
150	0,81
170	0,78
190	0,71
210	0,63
230	0,47

Temperatura (°C)	Coeficientes de modificação ( $k_{e90,0}$ )
20	1,00
40	0,77
50	0,68
60	0,58
70	0,49
80	0,62
90	0,59
100	0,56
110	0,52
130	0,46
150	0,64
170	0,58
190	0,52
210	0,44
230	0,32

#### 4.10.2 Coeficientes de modificação mínimos globais e as normas NDS (2005) e NCh 1198 (2006)

Na **Tabela 35**, são apresentados os coeficientes de modificação para resinosas e folhosas obtidos a partir da análise dos valores mínimos de todas as propriedades ensaiadas, juntamente com os coeficientes de modificação propostos pelas normas americana NDS (2005) e chilena NCh 1198 (2006), entre 20 °C e 70 °C. Observou-se que as duas normas apresentam um coeficiente de modificação único. Ambas as normas não especificam a espécie de madeira e consideram todas as propriedades mecânicas da madeira.

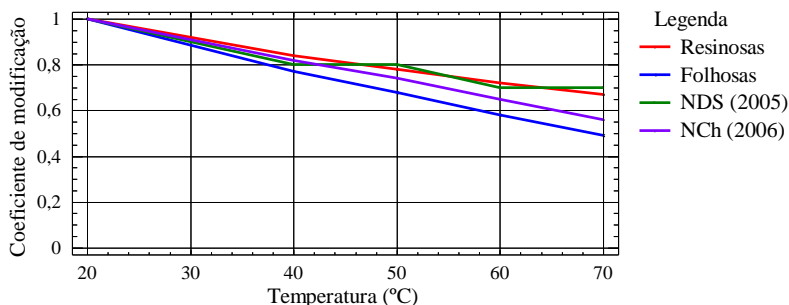
Os coeficientes de modificação obtidos do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum* (folhosas) são menores que aqueles apresentados pelas normas NDS (2005) e NCh 1198 (2006) em todos os níveis de temperatura. Isso não acontece com os coeficientes de modificação do *Pinus taeda*, uma resinosa. Somente a 70 °C, o

coeficiente de modificação situa-se entre os valores propostos pelas normas NDS (2005) e NCh 1198 (2006).

**Tabela 35:** Coeficientes de modificação propostos, comparados com as normas NDS (2005) e NCh 1198 (2006).

Temperatura (°C)	Resinosas	Folhosas	NDS	NCh 1198
	$k_{w,\theta}$	$k_{w,\theta}$	$k_{w,\theta}$	$k_{w,\theta}$
20	1,00	1,00	1,00	1,00
40	0,84	0,77	0,80	0,82
50	0,78	0,68	0,80	0,74
60	0,72	0,58	0,70	0,65
70	0,67	0,49	0,70	0,56

As diferenças existentes entre os coeficientes de modificação obtidos nesta pesquisa e os apresentados pelas normas NDS (2005) e NCh 1198 (2006) não foram muito grandes, mas eram esperadas, pois foram determinados a partir de espécies de madeira diferentes e cultivadas em lugares distintos. Contudo, os resultados indicam que existe um padrão de comportamento similar, que precisa continuar a ser investigado, a fim de permitir a generalização desse comportamento para grande parte das espécies de madeira (**Figura 84**).



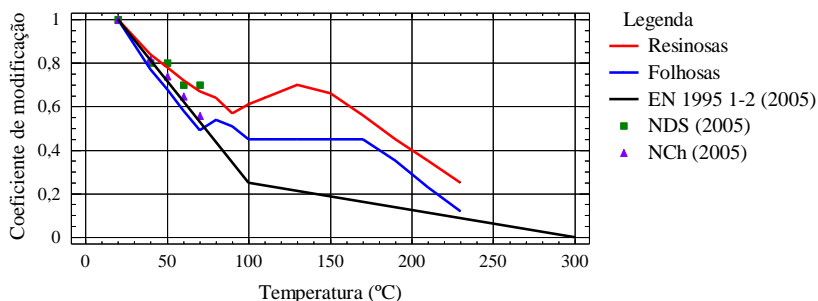
**Figura 84:** Coeficientes de modificação da pesquisa e NDS (2005) e NCh 1198 (2006).

#### 4.10.3 Coeficientes de modificação mínimos globais e EN 1995 1-2 (2005)

A **Figura 85** apresenta os coeficientes de modificação obtidos nesta pesquisa e os apresentados pelas normas ADS (2005), NCh 1198 (2006) e pelo EN 1995 1-2 (2005). Observou-se que as normas NCh 1198 (2006) e a EN 1995 1-2 (2005) apresentam um comportamento similar entre 20 °C e 70 °C, porém, os valores são inferiores à norma ADS (2005). Entre 70 °C e 230 °C, os coeficientes de modificação obtidos nesta pesquisa são superior aos apresentados pela norma EN 1995 1-2 (2005).

A **Figura 85** apresenta os coeficientes de modificação do *Pinus taeda* (resinosa), do *Eucalytus saligna* e do *Schizolobium amazonicum* (folhosas), obtidos a partir da análise dos valores mínimos de todas as propriedades estudadas e os apresentados pela norma europeia (EN 1995 1-2). Foi observado que, entre 20 °C e 70 °C, os coeficientes de modificação obtidos para as espécies folhosas são menores do que aqueles apresentados pela norma europeia. Isso indica a necessidade de uma reavaliação dos coeficientes de modificação com outras espécies folhosas, a fim de garantir o mesmo nível de segurança apresentado pelo EN 1995 1-2 (2005).

Também foi observado que os coeficientes de modificação obtidos para o *Pinus taeda* entre 20 °C e 90 °C são superiores aos valores propostos pela norma europeia. Os resultados indicam que a segurança está garantida, mas é necessário pesquisar para outras espécies resinosas, a fim de encontrar um comportamento padrão dessa categoria de madeira.



**Figura 85:** Coeficientes de modificação propostos, comparados com as normas EN 1995 1-2 (2005), NDS (2006) e NCh (2005).

#### 4.10.4 Proposta dos coeficientes de modificação para espécies resinosas e folhosas

A **Tabela 36** apresenta coeficientes de modificação devido à temperatura para todas as propriedades mecânicas do *Pinus taeda*, do *Eucalyptus saligna* e do *Schizolobium amazonicum*, para todas as propriedades entre 20 °C e 230 °C. Foram considerados dois coeficientes de modificação: um para a espécie resinosa e outro para as espécies folhosas.

São propostos coeficientes de modificação para estruturas ou elementos de estruturas em madeira expostas à temperatura entre 20 °C e 70 °C. Esta faixa de temperatura pode ser atingida em telhados devido à radiação solar, quando valores médios de temperatura ambiente alcançam a 40 °C.

Percebe-se que o *Eucalyptus saligna* apresenta os menores coeficientes de modificação ( $k_{\theta}$ ) para todas as propriedades estudadas. Isso pode ser devido ao efeito negativo da temperatura sobre a massa específica, o que já foi comentado nas seções 4.2 e 4.3. Embora utilizadas três espécies de madeira, uma espécie resinosa e duas espécies folhosas, com massas específicas tão diferentes, o comportamento apresentado pelo *Eucalyptus saligna* pode estar associado diretamente com as propriedades anatômicas e físicas desta espécie. É fato conhecido que esta espécie apresenta problemas de retração e fendas internas quando submetida a temperaturas elevadas.

Os coeficientes de modificação ( $k_{w,\theta}$ ) propostos por tipo de madeira, um para resinosas e outro para folhosas, são devidos, principalmente, ao comportamento apresentado pelas espécies estudadas e englobam todas as propriedades mecânicas da madeira.

A **Tabela 36** também apresenta coeficientes de modificação entre 70 °C e 230 °C. Esses coeficientes podem ser utilizados em conjunto com outras propriedades térmicas e físicas da madeira, para se estimar o comportamento mecânico da madeira a temperaturas elevadas. A estimação do comportamento mecânico pode ser feita com modelos numéricos avançados e dessa forma conhecer o comportamento da madeira em situação de incêndio.

**Tabela 36:** Coeficientes de modificação para resinosas e folhosas.

Temperatura (°C)	Coeficientes de modificação ( $k_0$ )		Coeficientes para
	Resinosas	Folhosas	
20	1,0	1,0	Temperaturas ambientes
40	0,84	0,77	
50	0,78	0,68	
60	0,72	0,58	
70	0,67	0,49	
80	0,64	0,54	Situação de incêndio
90	0,57	0,51	
100	0,61	0,45	
110	0,64	0,45	
130	0,70	0,45	
150	0,66	0,45	
170	0,56	0,45	
190	0,45	0,35	
210	0,35	0,23	
230	0,25	0,12	

#### 4.10.5 Conclusões parciais

Foram apresentados os resultados dos ensaios à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo, ao embutimento perpendicular às fibras e à flexão estática, entre 20 °C e 230 °C, para o *Pinus taeda*, para o *Eucalyptus saligna* e para o *Schizolobium amazonicum*.

Verifica-se que a temperatura reduz consideravelmente as propriedades mecânicas da madeira. Isto foi constatado em todas as propriedades estudadas para os corpos de prova expostos à ação da temperatura.

Os coeficientes de modificação apresentam valores similares àqueles apresentados pela EN 1995 1-2 (2005), NDS (2005) e NCH (2006), porém estudos exaustivos precisam ser feitos a fim de permitir a generalização desse comportamento para grande parte das espécies de madeira.

Foram propostos coeficientes de modificação para espécies resinosas e folhosas, quando estruturas ou elementos de madeira atingem entre 20 °C e 70 °C, oriundas de temperatura ambiente. Também foram propostos coeficientes de modificação entre 70 °C e 230 °C, temperaturas que podem ser oriundas de uma situação de incêndio ou pré-incêndio.

Tendo em vista que a norma NBR 7190:1997 apresenta coeficientes de ponderação por propriedades mecânica da madeira, da mesma forma podem ser propostos coeficientes de modificação devidos ao efeito da temperatura ( $k_{w\theta}$ ), para cada uma das propriedades mecânicas estudadas. Portanto, para obter coeficiente de modificação para cada uma das propriedades, é preciso realizar ensaios mecânicos exaustivos com outras espécies de madeira na busca de um comportamento padrão.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi avaliada a influência da temperatura nas resistências à compressão, ao cisalhamento, ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras e à flexão estática, para as espécies *Pinus taeda*, *Eucalyptus saligna* e *Schizolobium amazonicum*, oriundas de florestas plantadas do estado de Santa Catarina, Paraná e da Região amazônica, quando submetidas à temperatura entre 20 °C e 230 °C. Foram usadas três amostras com 12% de teor de umidade, totalizando 2025 corpos de prova: 750 de *Pinus taeda*, com massa específica 429 kg/m<sup>3</sup>; 750 de *Eucalyptus saligna*, com massa específica 778 kg/m<sup>3</sup>; e 525 de *Schizolobium amazonicum*, com massa específica 372 kg/m<sup>3</sup>.

Devido ao efeito negativo da temperatura na resistência mecânica da madeira, foram propostas duas faixas de coeficientes de modificação das propriedades mecânicas para resinosas e folhosas. Na primeira faixa, entre 20 °C e 70 °C, os coeficientes de modificação podem ser usados diretamente na determinação da resistência de cálculo desse material. Na segunda faixa, entre 70 °C e 230 °C, os coeficientes de modificação podem ser usados na determinação da resistência de elementos estruturais por meio de modelagem numérica tais como métodos de elementos finitos. Os resultados desta pesquisa levam às seguintes conclusões:

- a) a exposição dos corpos de prova a altas temperaturas provoca alteração da coloração das amostras, tanto interna quanto externamente. Essas alterações se iniciam a 130 °C, para o *Pinus taeda*, e a 150 °C, para o *Eucalyptus saligna*. As alterações são devidas, provavelmente, à saída dos extrativos e a exsudação de resinas, de ceras e de compostos orgânicos, que migram para a superfície da madeira durante o aquecimento da madeira;
- b) a exposição a temperaturas elevadas dos corpos de prova, principalmente os de compressão paralela às fibras, provocou fendas nos topos dos mesmos das espécies *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna*, o que foi constatado a partir de 60 °C, sendo estas mais severas a partir de 150 °C;

- c) durante o aquecimento dos corpos de prova, observou-se um aumento da retração da secção transversal com o aumento da temperatura de ensaio, alcançando o valor máximo de retração a 230 °C. Este fenômeno ocorre para as duas espécies;
- d) os corpos de prova de *Eucalyptus saligna*, com massa específica superior a 700 kg/m<sup>3</sup>, apresentaram rachaduras profundas em suas faces, quando aquecidos a temperaturas de ensaio entre 150 °C e 230 °C;
- e) no ensaio de flexão estática, os corpos de prova de *Pinus taeda* apresentaram ruptura por tração, por tração e fragmentação e por ruptura frágil, com o aumento da temperatura de ensaio. Já para o *Eucalyptus saligna*, entre 20 °C e 170 °C, a ruptura ocorre na parte inferior, ocasionada pelas forças de tração. A 230 °C, a ruptura ocorre na parte superior dos corpos de prova, devidas às tensões de compressão;
- f) nos ensaios de cisalhamento paralelo às fibras realizados para o *Pinus taeda* e para *Eucalyptus saligna*, verificou-se que a ruptura das amostras ocorre no plano de cisalhamento paralelo ao eixo dos corpos de prova em todos os níveis de temperatura;
- g) para os ensaios de embutimento paralelo às fibras, as falhas foram semelhantes para o *Pinus taeda* e para *Eucalyptus saligna*. Elas se caracterizavam por um esmagamento das fibras mais próximas ao parafuso, seguido de uma ruptura das mesmas, que pode ser considerada o início do fendilhamento da região;
- h) nos ensaios de embutimento paralelo às fibras ocorreram falhas por fendilhamento, que foram produzidas pela ruptura por tração normal às fibras ao longo de planos paralelos, na direção da força transmitida pelo parafuso à madeira, no *Pinus taeda* e no *Eucalyptus saligna*;
- i) para os ensaios de embutimento perpendicular às fibras da espécie *Eucalyptus saligna*, a ruptura dos corpos de prova ocorreu por embutimento do parafuso na madeira. A ruptura se caracteriza pelo esmagamento e forte adensamento das fibras próximas ao parafuso, que em alguns casos, ocasiona fendas horizontais nas faces dos corpos de prova;



- j) quando comparados os valores médios de resistência normalizada, por nível de temperatura entre as faixas de massa específica para o *Pinus taeda*, verificou-se, em geral que não existem diferenças estatisticamente significativas com 95% de confiança, indicando que pequenas variações de massa específica dentro da mesma espécie não afeta a redução da resistência devida à temperatura;
- k) existe diferença, estatisticamente significativa, com um nível de confiança de 95%, das propriedades mecânicas do *Pinus taeda* e do *Eucalyptus saligna* obtidas nos níveis de temperatura estudados indicando a influência deste parâmetro sobre as propriedades mecânicas da madeira;
- l) observou-se que o *Eucalyptus saligna* apresenta uma maior resistência mecânica à temperatura ambiente em todas as propriedades mecânicas estudadas, e também a maior redução da resistência mecânica;

Para dar continuidade aos trabalhos sobre o comportamento mecânico da madeira a temperaturas elevadas, e tendo como base os resultados obtidos neste trabalho, considera-se que trabalhos futuros deverão:

- a) analisar quimicamente o grau de degradação térmica da celulose, hemicelulose e lignina, em diferentes níveis de temperaturas de aquecimento;
- b) analisar a influência simultânea da temperatura e massa específica de várias espécies de folhosas e resinosas;
- c) utilizando a metodologia descrita neste trabalho, realizar ensaios mecânicos com outras espécies de madeiras nativas de florestas plantadas, para conhecer o comportamento mecânico a temperaturas elevadas;
- d) determinar coeficientes de modificação nas propriedades mecânicas por efeito da temperatura em outras espécies de madeira, a fim de verificar a existência de comportamentos similares aos observados nesta pesquisa;

- e) realizar ensaio mecânico de elementos estruturais em escala real em situação de incêndio.

## 6 BIBLIOGRAFIA

ALÉ, R.; KOTILAINEN, R.; ZAMAN, A. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180–225 °C **Wood Science and Technology**, v. 36, p.163–171, 2002.

AKLTA, K.; KASE, M. Determination of kinetic parameters for pyrolysis of cellulose and cellulose treated with ammonium phosphate by differential thermal analysis and thermal gravimetric analysis. **Journal Polymeric Science**, v. 5, n. A-1, p.833–848, 1967.

ALFTHAN, E.; DE RUVO, A.; BROWN, W. Studies on polymorphy in cellulose. **Polymer**, v. 14, n.7, p. 329–341, 1973.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM E119-95a Fire tests of building construction and materials**. Philadelphia, 1995. 1 CD ROM.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM D143-94**. Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. Philadelphia, USA, 1995.

ARMELIN, H.S.; CHERRY, N. Use and performance evaluation of radiant barriers in the construction industry. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, v.1, n.1, p.79–82, 2004.

ARSENEAU, D.F. The differential thermal analysis of wood. **Canadian Journal Chemical**, v.38 p.1915–1919, 1961.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: 1997**. Projeto de estruturas de madeira, Anexo G: Classificação visual de madeira serrada de coníferas, Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário Estatístico da ABRAF** Brasília, 2010. 135 p.

ATALLA, R.H. The full potential of native cellulose fibers. **Southern Pulp and Paper Manufacturer**, v.40, n.8, p.12–15, 1977.

ATTALA, R. H. **The structure of native cellulose**. In: PROCEEDINGS OF TRICEL SIMPOSIUM ON TRICHODERMA REESEI CELLULASES AND OTHER HIDROLASES, 1993, 2. Helsinquia, **Anais Helsinquia: Foundation for Biotechnical and Industriual Fermentation Research**, 1993. v8, p. 281–290.

ATAK, D.; HEITNER, C. Dynamic mechanical properties of sulphonated eastern *Black spruce*. **Pulp Paper Canadian Transference Technology**, v.5, n.4 ,TR99, 1979.

ATREYA, A. **Pyrolysis, ignition, and flame spread on horizontal surfaces of wood**. PhD, Thesis–Harvard University, Cambridge, MA, 1983, 112 p.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 1520.4**. Timber Structures Code. Part 4: Fire resistance of timber members, 1990.

BABRAUSKAS, V. Ignition of Wood, A Review of the State of the Art, **Interflam, Interscience Communications Ltd**, London, p. 71–88, 2001.

BABRAUSKAS, V. **Wood char depth: interpretation in fire investigations**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE INVESTIGATION, FIRE SERVICE COLLEGE, 2004, June, Moreton in Marsh. United Kingdom, 2004.

BACK, E.L.; SALMÉN, N.L. Glass transition of wood components hold implications for molding and pulping processes. **Tappi Journal**, v.65, n. 7, p.107–110, 1982.

BANCO REGIONAL DE DESENVOLVIMENTO DO EXTREMO SUL – BRDE: **Florestamento Na Região Sul Do Brasil**, Uma Análise Econômica, Setembro, 2008.

BARRICHELO, L.E.G. e BRITO, J.O. **A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel**. Brasília/DF, PRODEPEF, Série de Divulgação n° 13, 145p, 1976.

BARTKOWIAK, M.; ZAKRZEWSKI, R. Thermal degradation of lignin isolated from wood. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v.77 p.295–304, 2004.

BEALL, F.C.; EICKNER, H.W. Thermal degradation of wood components. **Forest Products Research Paper**, FPL, 1970, 130 p.

BECKER, H.; HÖGLUND, H.; TISTAD, G. Frequency and temperature in chip refining. **Paper Pulp**, v.59, n.3, p.123–130, 1977.

BEDNAREK, Z.; GRIŠKEVIČIUS, M.; ŠAUČIUVĖNAS, G. Tensile, compressive and flexural strength reduction of timber in fire. **Statybinės konstrukcijos ir technologijos**. v.1, n.3, p.148–156, 2009.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce. **Wood Holzforschung**, v.57, p.539–546, 2003.

BENGTSSON, C.; BETZOLD, D. **Bending strength and stiffness of Norway spruce timber-influence of high temperature drying**. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD, 2000, Boku, Vienna, 2000. P 139–149.

BERKOWITZ, N. The differential thermal analysis of coal. **Fuel**, v.36, p.355–373, 1957.

BHUIYAN, M.R.T; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. **Wood science and technology**, v.46, p.431–436, 2000.

BISANDA, E.T.N. e ANSELL, M.P. The effect of silane treatment on the mechanical and physical properties of sisal-epoxy composites. **Composites Science and Technology**, v.41, p.165–178, 1991.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. Krieger Publishing. ISBN 0-89464-777-6. Nova York, 1993. 712 p.

BODÎRLĂU, R., SPIRIDON, I.; TEACĂ, C.A. Chemical investigation of wood tree species in Temperate forest in east-northern Romania. **Bio-Resources**, v.2, n. 1, p.41–57, 2007.

BOONSTRA, M.J.; TJEERDSMA, B.F. Chemical analysis of heat treated softwoods. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.64, p.204–211, 2006.

BOONSTRA, M.J.; VAN ACKER, J.; PIZZI, A. **Anatomical and Molecular Reasons for Property Changes of Wood after Full-scale Industrial Heat Treatment**. In: EUROPEAN CONFERENCE ON WOOD MODIFICATION, 2007.

BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest products and wood science. An Introduction**. New York: Blackwell Publishing, 2003. 554 p.

BRADBURY, A.G.W.; SAKAI, Y.; SHAFIZADEH, F.A. Kinetic model for pyrolysis of cellulose. **Journal of Applied Polymer Science**, v.23, p.3271–3280, 1979.

BRASILIANSE, P.F.; CALIL, J.C.; OLIVEIRA, P.A. **Norma de projeto de estruturas de madeira**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. ISSN 0103-9822, BT/PEF/9602. São Paulo, 1996 122 p.

BRAUNER, A.B.; LOOS, W.E. Color changes in Black Walnut as a function of temperature, time and two moisture conditions. **Forest Products Journal**, v.18, p.29–34, 1968.

BROIDO, A. Thermo gravimetric and differential thermal analysis of potassium bicarbonate contaminated cellulose. **Pyrodynamics**, v.4, p. 243–251, 1966.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Comportamento Isolados da Lignina e da Celulose da Madeira Frente a Carbonização**. Instituto de pesquisas e estudos florestais. Circular Técnica, n. 28, Pbp/3.1.6, 2001.

BRITO, J.O.; PIEDADE, A.L.; PINCELLI, S. M.; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorretificação sobre a colagem na madeira de Eucalyptus saligna e Pinus caribaea var. hondurensis. **Scientia Forestalis**, n. 61, p. 122–132, 2002.

BRITO, J.O.; CHAGAS PESSOA A.M; FILHO E.B. Avaliação da madeira termorretificada de Eucalyptus grandis, submetida ao ataque de cupim de madeira seca, Cryptotermes brevis. **Scientia Forestalis**, n. 72, p. 11–16, 2006.

BRYCE, D.J.; GREENWOOD, C.T. Thermal degradation of starch. Part 5. Kinetic study of the major volatiles from potato starch and its components. **Applied Polymeric Symposium**, v.2, p.149–158, 1966.

BRYDEN, K.M. **Computational modeling of wood combustion**, PhD. Thesis. University of Wisconsin-Madison, W, 1998.

BROWNING, B.L. **The Chemistry of Wood**. New York, John Wiley, 1963. 689 p.

BROWNE, F.L. **Theories of the combustion of wood and its control**. FPL. 2136. USDA Forest Products Laboratory, Madison, W, 1958.

BUCHANAN, A.H. **Mechanical Properties of Wood Exposed to Fire**. Department of Civil Engineering University of Canterbury, New Zealand, 1998, p.238–245.

BUCHANAN, A.H. **Structural Design for Fire Safety**. Chapter 10 Timber Structures, John Wiley & Sons Ltd, 2001. 421 p.

BURGER, L. M. e RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.157 p.

BURMESTER, A. Zur Dimensionsstabilisierung von **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.33, p.333–335, 1975.

BURTIN, P., JAY-ALLEMAND, C., CHARPENTIER, J.P. e JANIN, G. Natural wood colouring process in *Juglans sp.* (*J. nigra*, *J. regia* and hybrid *J. nigra* 23 x *J. regia*) depends on native phenolic compounds accumulated in the transition zone between sapwood and heartwood. **Trees**, v.12, p.258–264, 1998.

CHAFE, S.C. Growth stresses in trees. **Australian Forest Research**, v.9, p.203–223, 1979.

CHAND, N.; HASHMI, S.A.R. Mechanical properties of sisal fibre at elevated temperatures. **Journal of Materials. Science**, v.28, p.6724–6728, 1993.

CHARRIER, B.; HALUK, J.P.; METCHE, M. Characterization of European oak wood constituents acting in the brown discoloration during kiln drying. **Holzforschung**, v.49, p.168–172, 1995.

CHATTERJEE, P.K.; CONRAD, C.M. Kinetics of the pyrolysis of cotton cellulose. **Text Research Journal**, v.36, p.487–494, 1966.

COLLI, A. **Caracterização da madeira de paricá (*Schyzolobium amazonicum* Huber ex.Ducke) e propriedades de chapas de partículas aglomeradas com diferentes proporções de fibras de coco (*Cocos nucifera* L).** Dissertação de Mestrado Universidade de Viçosa, Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. 50 p.

COLLIER, P.C.R. Charring Rates of Timber. **Branz Study Building Research Association** of New Zealand, Report No. 42, 1992.

COMBEN, A.J. The effect of high temperature kiln drying on the strength properties of timber. **Wood and science**, v.20, n.8, p.311–313, 1955.

CONESA, J.A.; CABALLERO, J.A.; MARCILLA, R.F. Analysis of different kinetic models in the dynamic pyrolysis of cellulose. **Elsevier, Thermochimica Acta**, v.254, p.175–192, 1995.

D' ALMEIDA, M.L. **Cellulose e Papel – Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica**, v.1, 2ª ed., São Paulo, Senai-IPT, 1988. 559 P.

DIAS, R.A. **Variabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de Eucalyptus para a construção civil.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de madeiras. Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, Brasil, 2002. 70 p.

DIESTE, A. **Colour development in *Pinus radiata* D. Don. under kiln-drying conditions.** A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Engineering in Chemical and Process Engineering. University of Canterbury, 2002. 97 p.



DIROL, D. **Improvement of wood durability by retification process.** In: 24th ANNUAL MEETING OF INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION, 1993, Paris, France, 1993.

DINWOODIE, J.M. **Timber its nature and behaviour.** Princes Risborough Laboratory. Building Research Establishment. New York:Van Nostrand Reinhold Company Ltd., 1981. 190 p.

DOMANSKY, R.; RENDOS, F. On the pyrolysis of wood and its components. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.20, p.473–476, 1962.

DOMBURS, G.; KISELIS, O. Thermal analysis in the chemistry of wood. **Latv. PSR Zinat. Akad. Vestis**, v.12, p.52–57, 1966.

DRYSDALE, D. **Introduction to Fire Dynamics.** 2nd ed. John Wiley and Sons. England, 1998. 451 p.

DURLO, M.A. **Determinação de variáveis para caracterização de *Pinus elliottii* com finalidade estrutural.** In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL 6, NOVA PRATA, 1988, RS. Anais Nova Prata, 1988. P. 1097 – 1113.

DURLO, M.A.; MARCHIORI, J.N.C. **Tecnologia da madeira:** Retratibilidade Santa Maria, CEPEF/FATEC, p.33, (Série Técnica, 10), 1992.

ESTEVES, B.M.; PEREIRA, H.M. Wood modification by heat treatment: a review, **BioResources**, v.4, n.1, p.370–404, 2009.

EUROPEAN STANDARD EUROCODE. **Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General rules-Structural fire design.** European Committee for standardization, Brussels, 2005.

EUROPEAN STANDARD EUROCODE. **Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions** Densities, self-weight, imposed loads for buildings, European Committee for standardization, Brussels, 2005.

FAHERTY, K.F.; WILLIAMSON, T.G. **Wood engineering and construction handbook**, 2 ed, Mc Graw-Hill, Inc New York, 1995. 952p.

FEIST, W.C.; HAJNY, G.J.; SPRINGER, E.L. Effect of storing green wood chips at elevated temperatures. **Tappi**, v.56, n.8, p.91–95, 1973.

FENGEL, D. Thermisch und Mechanisch Bedingte Strukturänderungen bei Fichtenholz. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.24, n.11, p.529–536, 1966.

FENGEL, D. Über die Veränderungen des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200 °C. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.25, p.102–111, 1967.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Walter de Gruyter Publisher. New York, 1989. 613 p.

FOELKEL, C.E.B.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: Sua verdadeira utilização como índice de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de celulose. **O papel**, São Paulo, v.53, n.5, p.35–40, 1992.

FONSECA, N.D. **Comportamento de ligações em estruturas de madeira sob influência de temperaturas elevadas**. Dissertação de Mestre em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2009. 85 p.

FRÜHWALD, E. Effect of High-temperature drying on properties of *Norway spruce* and *Larch*. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.65, p.411–418, 2007.

GARROTE, G.; DOMINGUEZ, H.; PARAJO, J.C. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.57, p.191–202, 1999.

GERHARDS, C.C. Effect of high temperature drying on tensile strength of *Douglas fir* 2x4'. **Forest products journal**, v.29, n.3, p.39–46, 1979.

GERHARDS, C.C. Effect of the Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate Effects. **Wood and Fiber**, v.14, n.1, p.4–36, 1982.

GERHARDS, C.C. Effects of high temperature drying on bending strength of *Yellow poplar* 2 by 4's. **Forest products journal**, v.33, n.2, p.61–67, 1983.

GIEBELER, E. Dimensions stabilisierung von Holz durch eine Feuchte. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.41, p.87–94, 1983.

GINDL, W.; GUPTA, H.S.; SCHOBERL, T.; LICHTENEGGER, H.C.; FRATZL, P. Mechanical properties of spruce wood cell walls by nanoindentation. **Appl. Phys.** V. 79, p.2069–2073, 2004.

GOLOVA, O.P.; KRYLOVA, R.G. Thermal decomposition of cellulose and its structure. **Doklady Akad. Nauk**, S.S.S.R. Russian, v.116, n.3, p.419–421, 1957.

GORING, D.A.I. Thermal softening of lignin, hemicelulose and cellulose. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, v.64, n.12, p.517–527, 1963.

GOSELINK, R.; KROSSE, A.; VAN DER PUTTEN, J.; VAN DER KOLK, J.; KLERK-ENGELS, B.; E DAM, J. Wood preservation by low temperature carbonization. **Ind. Crop.Prod.**, v.19, p.3–12, 2004.

GREEN, D.W.; WINANDY, J.E.; KRETSCHMANN, D.E. Mechanical properties of wood. **Wood handbook wood as an engineering material**. Gen Tech Rep FPL-GTR-113. US department of Agriculture, Madison, p. 1–45, 1999.

GREEN, D.W. e EVANS, J.W. **Flexural properties of structural lumber products after long term exposure to 150 °F and 75% relative humidity**. In: PROCEEDINGS, 35th INTERNATIONAL PARTICLE BOARD, COMPOSITE MATERIAL SYMPOSIUM, 2001. Pullman, 2001. Washington, 2001. P. 3–15.

GREENBERG, A.R.; MEHLING, A.; LEE, M.; BOCK, J.H. Tensile behavior of grass. **Journal Material Science**, v.24, p.2549–2554, 1989.

GROMOV, V.; KHROL, Y.; DEGINA, R. Zb. Pr. Drev. **Fak. Vys. Sk. Les.** In Fengel et al., 1972.

HARLOW, W.M.; HARRAR, E.S. **Textbook of dendrology**. New York, Mc Graw Hill Book Company, 4. Ed, 1958. 512 p.

HATAKEYAMA, H.; HATAKEYAMA, T.; NAKANO. DSC study on recrystallization of amorphous cellulose with water. **Journal Cellulose Chemical and Technology**, v.8, p.495, 1974.

HATAKEYAMA, H.; IWASHITA, K.; MESHITSUKA, G. ;NAKANO, J.J. Effect of hydrogen bond formation on dynamic mechanical properties of amorphous cellulose. **Journal Japan Wood Research**, v.21, n.11, p.618, 1975.

HELLMEISTER, J.C. **Madeiras e suas características**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1983, São Carlos, SP, Brasil, Anais. São Carlos, USP-EESC, v.1, 1983. P. 1–32.

HIETALA, S.; MAUNU, S.; SUNDHOLM, F.; JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. Structure of thermally modified wood studied by liquid state NMR measurements. **Holzforschung**, v.56, p.522–528, 2002.

HILLIS, W.E. High temperature and chemical effects on wood stability Part 1: General considerations. **Journal Wood Science Technology**, v.18, p.281–293, 1984.

HOLMES, F.H. ; SHAW, C.J.G. The pyrolysis of cellulose and the action of flame-retardants. I. Significance and analysis of the tar. **Journal Applied. Chemical**, v.11, p.210–216, 1961.

IFJU, G. Tensile Strength Behavior as a Function of Cellulose in Wood. **Forest Products Journal**, v.8, p.366, 1964.

INO, A.; SHIMBO, I. **Sistema Construtivo em Madeira de Eucalipto para Habitação Social: Construção de Protótipo**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1995, Anais Rio de Janeiro, ENTAC/UFRJ, 1995.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION. **NCh 1198**. Diseño e cálculo de estructuras en maderas. Santiago, Chile, 2006.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS–IPT. **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. 2<sup>da</sup>, São Paulo, 2009, 103p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS–IPT. **Manual de Preservação de Madeiras**, Volume I, 1986. 342 p.

IRVINE, G. The glass transitions of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis. **Journal Tappi**, v.67, n.5, p.116–121, 1984.

JAKOBSON, M.K.; ERINSZ, P.P. **Khim. Drev**, v.3, n.3, p 35–48, 1981.

JUNKKONEN, R.; HERÄJÄRVI, H. **Physical properties of European and Hybrid aspen wood after three different drying treatments**. In: CONFERENCE OF WOOD STRUCTURE AND PROPERTIES, Zvolen, Slovakia, 2006. P. 257–264.

KACÍK, F.; KACÍKOVÁ, D.; GIERTLOVÁ, Z.; GEFFERT, A. Einfluß hydrothermischer Behandlung auf die Ligninveränderung von Ahornholz (*Acer pseudoplatanus* L.). **Drevársky Výskum**, v.44, p.31–40, 1999.

KAIMIN, I.F.; KARLIWAN, W.P.; YOELOWICZ, M.J. **Academy teachings Latvian**, SSR, v.8, p.112, 1979.

KÄLLANDER, B.; BENGTSSON, C. High Temperature drying of Norway Spruce: effects of elevated temperature on wood properties. In: EX PROCEEDINGS: COST E15 CONFERENCE, Athens, N.A.G.R.E.F., April, 2000.

KARGIN, V.A.; KOZLOV, P.V.; WANG, NAI-CHIANG., Doklady Akad. **Nauk. SSSR**, v.130, n.2, p.356, 1960.

KATO, K.; TAKAHASHI, N. Pyrolysis of cellulose. II Thermo gravimetric analyses and determination of carbonyl and carboxyl

groups in pyrocellulose. **Agriculture and Biological Chemical**, v.31, n.5, p.519–524, 1967.

KEYLWERTH, R.; CHRISTOPH, N. Study of thermal decomposition of wood by using differential thermal analysis. **Materialprüfung**, v.2, n.8, p.281–288, 1960.

KIFETEW, G.; THUVANDER, F.; BERGLUND, L.; LINDBERG, H. The effect of drying on wood fracture surfaces from specimens loaded in wet condition. **Journal Wood Science Technology**, v.32, p.83–94, 1998.

KILZER, F.J.; BROIDO, A. Speculations on the nature of cellulose pyrolysis. **Pyrodynamics**, v.2, p.151–163, 1965.

KLASON, C.; KUBAT, J. Thermal transitions in cellulose. Sven, **Papperstidn**, v.79, p.494–500, 1976.

KNUDSON, R.M.; SCHNIEWIND, A.P. Performance of structural wood members exposed to fire. **Forest Products Journal**, v.25, n.2, p.23–32, 1975.

KOCH, P. **Drying Sothern pine at high temperature**. In: NORTH AMERICAN DRYING SYMPOSIUM, 1985, Mississippi Forest Products Utilization Laboratory, Mississippi State University. 1985. P. 1–38.

KOLLMANN, F.F.P. **Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones**. 2.ed. Madrid: Reunidas, 1959. 675 p.

KOLLMANN, F.; SCHNEIDER, A. Über dass Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.41, p.87–94, 1963.

KOLLMANN, F.; FENGEL, D. Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.23, p.461–468, 1965.

KOLLMANN, F.; FENGEL, D. Changes in the chemical composition of wood by heat treatment. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.12, p.461–468, 1965.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. **Principles of wood Science and Technology**. In: Solid wood. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 1968. 592 p.

KOŠÍKOVÁ, B.; HRICOVINI, M.; COSETINO, C. Interaction of lignin and polysaccharides in beech wood (*Fagus sylvatica*) during drying processes. **Wood Science and Technology**, v.33, p.373–380, 1999.

KOSIK, M.; GERATOVA, L.; RENDOS, F.; DOMANSKY, R. Pyrolysis of Beech Wood and its Components. **Holzforsch Holzverw**, v.20, p.15–19, 1968.

KOZLIK, C.J. Effect of kiln temperatures on strength of *Douglas fir* and *Western hemlock* dimension lumber. **Forest Researcher Laboratory, Rep.** D-11, Corvallis, Oregon, 1968. 20 p.

KOZLIK, C.J. Kiln temperature effect on tensile strength of *Douglas fir* and *Western hemlock* lumber, **Forest Product Journal**. v.26, n.10, p.30–34, 1976.

KOTILAINEN, R. **Chemical changes in wood during heating at 150–260 °C**. PhD Thesis, Jyväskylä University, Research report 80, Finland, Press; 2000. 89 p.

KREBER, B.; HASLETT, A.N. The current story on kiln brown stain. Wood Drying. **FRI, New Zealand**, p.1–3, 1998.

KUBOJIMA, Y.; OKANO, T.; OHTA, M. Bending strength and toughness of heat treated wood. **Journal Wood Science**, v.46, p.8–15, 2000.

KUDO, K.; YOSHIDA, E. On the decomposition process of wood constituents in the course of carbonization. I. The decomposition of carbohydrate and lignin in mizunara (*Quercus cris-pula Blume*) wood. **Journal Japanese Wood Research**, v.3, n.4, p.125–127, 1957.

LADELL, J.L. High temperature kiln drying of Canadian woods. Report of exploration investigations on softwoods, **Forest Product Laboratory**, v.11, 1953. 170 p.

LAMBERTS, R. **Heat Transfer Through Roofs of Cost Brazilian Houses**. These Submitted in accordance with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Civil Engineering The University of Leeds, 1988. 145 p.

LAU, P.W.; BARRETT, J.D. **Modelling Tension Strength Behaviour of Structural Lumber Exposed to Elevated Temperatures**. In: PROCEEDINGS OF THE 5<sup>th</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE FIRE SAFETY SCIENCE, 1979, Melbourne, 1979. P.1177–1188.

LEVAN, S.L. Thermal degradation. In: Schniewind AP (Ed.): **Concise Encyclopedia of Wood & Wood-Based Materials**. Exeter, England, Pergamon Press, p.271–273, 1989.

LE VAN, S.M.; ROSS, R.J.; WINANDY, J.E. Effects of fire retardant chemicals on the bending properties of wood at elevated temperatures. **USDA Research Paper. FPL-RP-498**, Madison, WI. 1990.

LIE, T.T. **A Method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns**. Canadian J. Civil Engineering, v.4, p.161–169, 1977.

LIPSKA, A.E. The pyrolysis of cellulosic and synthetic materials in a fire environment. U.S. Clearinghouse Fed. **Science Technical Information**, AD-645858, 1966. 46 p.

LIMA, A.B.; REZENDE, M.A. Incrementos médios anuais de volume, massa, e energia do Liquidambar styraciflua na região de Agudos/SP. **Energia na Agricultura, Botucatu**, v.18, n.3, p.38–47, 2008.

LUOSTARINEN, K. **Effects of environmental and internal factors of trees and timber treatment on colour of dried birch (*Betula pendula*) wood**. Academic thesis Faculty of Forestry University of Joensuu June, 2006.

LUNDBERG, R.; DE RUVO, A. The influence of defibration and beating conditions on the paper making potential of recycled paper. **Svensk Papperstidn**, v.81, n.12, p.383–386, 1978.



MACLEAN, J.D. Rate of disintegration of wood under different heating conditions. **Proceeding of American Wood Preservers Association**, v.47, n.253, p.155–168, 1951.

MACLEAN, J.D. Effect of steaming on the strength of wood. **Proceeding of American Wood Preservers Association**, v.49, p.88–112, 1953.

MADSEN, B. **Properties of Plant Fibre Yarn Polymer Composites**. Technical University Of Denmark Report BYG DTU R-082 ISSN 1601-2917 ISBN 87-7877-145-5, 2004. 173 p.

MALLAN, F.S. **Eucalyptus improvement for lumber production**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995. Anais Piracicaba: IPEF/IPT, 1995. P. 1–19.

MCCURDY, M.C.; PANG, S.R.; KEEY, B. Surface Colour Change In Wood During Drying Above And Below Fibre Saturation Point. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v.8, n.1, p.31–40, 2006.

McMILLEN, J.M. Control of reddish-brown coloration in drying maple sapwood. Rep. N°. 0231, **Forest Products Laboratory, Forest Service research note**, Madison, Wi, USA, p.1–8, 1976.

McDONALD, A.G.; GIFFORD, J.S.; DARE, P.H.; STEWARD, D. Characterization of the condensate generated from vacuum-drying of radiata pine wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.57, p.251–258, 1999.

McDONALD, A.G.; FERNANDEZ, M.; KREBER, B.; LAYTNER, F. The chemical nature of kiln brown stain in radiata pine. **Holzforschung**, v.54, p.12–22, 2000.

McDONALD, A.G.; DARE, P.H.; GIFFORD, J.S.; STEWARD, D.; RILEY, S. Assessments of air emissions from industrial kiln drying of *Pinus radiata* wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.60, p.181–190, 2002.

MAINIERI, C. **Identificação das principais madeiras de comércio no Brasil**. São Paulo, IPT, Boletim N°31, 1956. 62 p.

MAJOR, W.D. The degradation of cellulose in oxygen and nitrogen at high temperatures. **Tappi**, v.41, p.530–537, 1958.

MALLAN, F.A. **Eucalyptus improvement for lumber production**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo, IPEF/IPT, **Anais**, São Paulo, IPEF/IPT, 05-06 abr, 1995. P. 1–19.

MANGALAM, A. **Electroheating Novel Process for Modifying Wood**. A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science with a Major in Forest Products in the College of Graduate Studies, University of Idaho, June, 2005.

MANNINEN, A.M.; PASANEN, P.; HOLOPAINEN, J. Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated *Scots pine* wood. **Atmospheric Environment Elsevier Science Ltd**, v.36, p.1763–1768, 2002.

MANRIQUEZ, M.J. **Influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas do paricá**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2008. 111 p.

MANRIQUEZ, M.J.; MORAES, P.D. **Influência da temperatura sobre a resistência ao embutimento do paricá**. In: XI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2008 Londrina, Julho, 2008.

MANRIQUEZ, M.J.; MORAES, P.D. **Resistências à compressão e à tração paralelas às fibras do paricá em temperaturas elevadas**. In: III JORNADAS CHILENAS DE ESTRUCTURAS DE MADERA Y I CONGRESO LATINOAMERICANO DE ESTRUCTURAS DE MADERA, 2009, Concepción, Chile, Noviembre, 2009 a.

MANRIQUEZ, M.J.; MORAES, P.D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Revista Ambiente Construído**, v.9, n.4, dezembro, 2009 b.

MANRIQUEZ, M.J.; MORAES, P.D. Influence of the temperature on the compression strength parallel to grain of paricá. **Construction and Building Materials**, v.24, p.99–104, 2010.

MARCHIORI, J.N.D. **Dendrologia das gimnospermas**. Santa Maria: Ed. da UFSM, 1996. 158 p.

MARTINES, E.A. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira: Proposta para simplificação de procedimentos metodológicos**. Dissertação de mestrado. Apresentada à área interunidades em ciências e engenharia de materiais. Universidade de São Paulo escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002, 76 p.

MASSERANN, C.; MARIAUX, A. Anisotropic de retrait et estructure du bois. Recherche de l'influence des caracteres morphologiques transverses des fibres. **Bois et Forêts des Tropiques**, n.209, p.35–47, 1985.

MIKKOLA, E. **Charring of Wood**. VTT-Technical Research Center of Finland, Exposed. VTT Research Reports 689 ISBN 951-38-3711-4.; Project PAL7003, 1990. 35 p.

MILLER, R.S.; BELLAN J.A. Generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lingnin kinetics. **Westerm States Section of the Combustion Institute**, Paper 96F-057, 1996.

MILLET, M.A. Chemical brown stain in sugar pine. **Journal of the Forest Products Research Society**, v.2, p.232–236, 1952.

MILLET, M.A.; GOEDKEN, V.L. Modification of cellulose fine structure. Effect of thermal and electron irradiation pretreatments. **Tappi**, v.48, p.367–371, 1965.

MILLER, R.B. **Wood as an Engineering Material**, Structure of Wood, Chapter 2. Forest Products Laboratory USDA Forest Service Madison, Wisconsin, 1999.

MILOTA, M.R. Warp and shrinkage of hem-fir stud lumber dried at conventional and high temperatures. **Forest Products Journal**, v.50, n.11-12, p.79–84, 2000.

MIRSHAWKA, V. **Probabilidades e estatística para engenharia**. Editorial Livraria Nobel, São Paulo, 1981. 483 p.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Applied statistics and probability for engineers**. 3rd edn. Wiley, New York, 2003. 450p.

MORA, A.; GARCIA, C.H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 112 p.

MORAES, P.D. Influence de la temperature on the modulus of elasticity (MOE) of *Pinus Sylvestre*. **Holzforschung**, v.58, p.143–147, 2004.

MORAES, P.D.; ROGAUME, Y.; TRIBOULOT, P. Influence of Temperature on the embedding strength. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.63, p.297–302, 2005.

MORESCHI, J.C. **Levantamento da qualidade da madeira em plantações artificiais de *Pinus elliottii* nos Estados do Sul do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1975. 162 p.

MÜLLER, U.; JOŠČÁK, T.; TEISCHINGER, A. Strength of dried and re-moistened *Spruce* wood compared to native wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.61, p.439–443, 2003.

MURPHY, E.J. Thermal decomposition of natural cellulose in vacuo. **Journal Polymer Science**, v.58, p.649–655, 1962.

NAKAMURA, K.; HATAKEYAMA, T.; HATAKEYAMA, H. Thermal properties of solvolysis lignin derived polyurethanes. **Polymer for advanced technology**, v.3, p.151–155, 1981.

NATIONAL DESIGN SPECIFICATION (NDS). For Wood Construction. **American Forest e Paper Association**, 2005. 174 p.

NEVELL, T.P.; ZERONIAN, S.H. **Cellulose Chemistry and its Applications**; Ellis Horwood Limited; New York, 1995. 358 p.

NEWMAN, R.H.; HEMMINGSON, J.A. Cellulose cocrystallization in hornification of kraft pulp, Proc. **ISWPC, Paper**, v.1, p.1–4, 1997.

NJANKOUO, J.M.; DOTREPPE, J.C.; FRANSSEN, J.M. Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods. **Fire and Materials**, v.28, p.15–24, 2004.

NOACK, D. Über die Heißwasserbehandlung von Rotbuchenholz im Temperaturbereich von 100 bis 180 **Holzforschung Holzverwertung**, 1969.

NORMALISATION FRANÇAISE **NF EN 383**. Détermination de caractéristiques de fondation et de la portance locale d'éléments d'assemblages de type broche, France, 1993.

NORMALISATION FRANÇAISE **NF B 51–008**. Détermination de la résistance à la flexion statique de petites éprouvettes sans défaut. France, 1987.

NORMALISATION FRANÇAISE **NF B 51–016**. Détermination du module d'élasticidade en flexion statique de petites éprouvettes sans défaut. France, 1987.

NORMALISATION FRANÇAISE **EN 1995-1-2**. Eurocode 5. Design of timber structures. Part1-2: General rules-Structural fire design. Final Draft. 74p, 2002.

NYMAN, C. The Effect of Temperature and Moisture on the Strength of Wood and Gluelines: **Forest Products Laboratory** Report N 6, 1980.

OHSAWA, J.; YONEDA, Y. Shear Test of Woods as a Model of Defibration. **Journal of the Japanese Wood, Research Society**, v.24, n.4, p.230–236, 1978.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. Tese Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 429 p.

OLTEAN, L.; TEISCHINGER, A.; HANSMANN, C. Temperature and cracking of wood. **BioResources**, v.2, n.4, p.789–811, 2007.

OLSSON, A.M.; SALMEN, L. **Humidity and temperature affecting hemicellulose softening in wood.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF COAST, 1997, action E8. Denmark, 1997. P. 269–279.

OSTMAN, B.A. Wood Tensile Strength at Temperature and Moisture Contents Simulating Fire Conditions. **Wood Science and Technology**, v.19, p.103–116, 1985.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 4.ed. New York: Mc-Graw-Hill, 1980. 722 p.

PETRI, V.N.; ANANYIN, P.I. The influence of high temperature drying on the mechanical properties of timber. **Industrial Wood Processing** No.4, Trans. From Russian D.P.No.7, 1960.

PESCADOR, W.; MANRÍQUEZ, M.; MORAES, P.D. **Influência da temperatura sobre a resistência ao arrancamento do paricá.** In: XI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2008, Londrina –Julho, 2008.

PINTO, M.E. **Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a grã para o *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*** Tese de Doutorado. EESC/IFSC/IQSC. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PONCSÁK, S.; KOCAEFE, D.; BOUAZARA, M.; PICHETTE, A. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science and Technology**, v.40, p.647–663, 2006.

PREUSSER, R. Plastic and Elastic Behaviour of Wood Affected by Heat in Open Systems. **Holz technologie**, v.9, n.4, p.229–231, 1968.

PRYOR, L.D. **The Biology of Eucalyptus.** London: Edward Arnold, 1976. 82 p.

RAMLAH, M.V.; GORING, D.A.I. Some dilatometric measurements of the thermal decomposition of cellulose, hemicellulose, and lignin. **Chemical Technology**, v.1, n.3, p.277–285, 1967.

RESENDE, D. J. **Análise da combustão e carbonização do *Eucalyptus spp* por termogravimetria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1995. 96 p.

ROFFAEL, E.; SCHALLER, K. The influence of thermal treatment on cellulose. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v.29, n.7, p.275–278, 1971.

ROUSSET, P.; PERR, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*Pinus robusta*) by a thermal treatment at high temperature. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v.62, p.113–119, 2004.

ROWELL, R.M.; YOUNG, R.A.; ROWELL, J.K. Paper and Composites from Agro-Based Resources. **Lewis Publishers**, New York, 1997.

RUNKEL, R.O.H.; WITT, H. Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von. **Hotz als Roh-und Werkstoff**, v.11, p.457–461, 1953.

SAKATA, I.; SENJU, R.J. **Applied Polymeric Science**, v.19, p.2799–2808, 1975.

SALAMON, M. High temperature and its effect on wood properties. **Forest Products Journal**, v.19, n.3, p.27–34, 1969.

SALAZAR, C.M.; CONNOR, M.A. Kinetic studies of the pyrolysis of wood, with particular reference to *Eucalyptus regnans*. In: AUSTRALIAN CONFERENCE ON CHEMICAL ENGINEERING, 1983, 11, Proceedings Brisbane, 1983.

SALMEN, N.L. Thermal softening of the components of paper, its effect on mechanical properties. **Pulp Paper Canadian. Trans. Technology**, v.5, n.3, p.45–50, 1979.

SALMEN, L. **Temperature and water induced softening behaviour of wood fiber based material**. Ph.D. Thesis. Department of Paper Technology. The Royal Institute of Technology. Stockholm. Sweden, 1982. 53 p.

SANO, E. Effects of temperature on the mechanical properties of wood. I. Compression parallel to grain. II. Tension parallel to grain. III. Torsion test. **Journal of the Japanese Wood Research Society**, v.7, n.4, p.147–150, 1961.

SANDERMANN, W.; SCHLAMBOM, F. On the effect of filtered ultraviolet light on wood Part I and Part II. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.20, p.245-285, 1962.

SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. **Lignins occurrence, formation, structure and reactions**. New York, Wiley - Interscience, 1971. 916 p.

SARDINHA, A.M; WOLFANGO, M.; VASCONCELOS, F.M. **Combustão Lenhosa Directa e Indirecta Sua Relevância para a Temática dos Fogos Florestais** Silva Lusitana, v.10, n.1, p.91–100, EFN, Lisboa. Portugal, 2002.

SCHAFFER, E.L. **Charring rate of selected woods-transverse to grain**. Madison, WI: US Department of agriculture, Forest Products Laboratory, 1967.

SCHAFFER, E.L. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strenght of dry *Douglas fir*. **Journal of testing and evaluation**, v.1, n.4, p.319–329, 1973.

SCHAFFER, E.L. **Strength Validation and Fire Endurane of Glued Laminate Timber Beams**. Research Paper FPL 467. US Forest Products Laboratory, Madison, WI, 1986.

SCHMIDT, V.K. Untersuchungen über die Ursachen der Verfärbungen von Eichenholz bei der technischen Trocknung. **Holzforschung und Holzverwertung**, v.38, p.25–36, 1986.

SCHNEIDER, A. Investigations on the influence of heat treatements within a range of temperature from 100 °C to 200 °C on the modulus of elasticity, maximum crushing strength, and impact work of *Pine sapwood* and *Beech wood*. **Holzforschung**, v.29, p.431–440, 1971.

SCHNEIDER, A. Investigations on the convection drying of lumber at extremely high temperatures Part 2: Drying degrade, changes in sorption, colour and strength of *Pine sapwood* and *Beech wood* at drying



temperatures from 110 to 180 °C. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v.31, p.198–206, 1973.

SCHNIEWIND, A.P. **Concise Encyclopedia of Wood and Wood-Based Materials**. Edition Elmsford, NY: Pergamon Press, p.271–273, 1985.

SCHWENKER, R.F.; PACSU, E. Pyrolytic degradation products of cellulose. **Chemical Engineers**, v.2, n.1, p.83–88, 1957.

SEBORG, R.M.; TARKOW, H.; STAMM, A.J. Effect of heat upon the dimensional stabilization of wood. **Journal Forest Product**, v.3, n.9, p.59–67, 1953.

SEHLSTEDT-PERSSON, S.M.B. High-temperature drying of Scots pine. A comparison between HT- and LT-drying. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.53, p.95–99, 1995.

SERGEEVA, V.N.; VAIVADS, A. Thermographic study of the pyrolysis of wood and its constituents. **Latvijas PSR Zinat, Akad, Russ**, v.80, n.9, p.103–108, 1954.

SILVA, J.C. Cresce a presença do eucalipto no Brasil. **Revista da Madeira**, Curitiba, n.92, p.61–66, 2005.

SHAFIZADEH, F. The chemistry of pyrolysis and combustion. In: Rowell, R.M., (Ed.), **The Chemistry of Solid Wood**. Advances in Chemistry Series, Number 207. Washington, DC: American Chemical Society. Chapter 13, p.489–529, 1984.

SHAFIZADEH, F. Pyrolytic reactions and products of biomass. In: Overend PP; Milne TA; Mudge LK (Eds.): **Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion**. Elsevier. New York, p.183–217, 1985.

SIAU, J.F. **Wood: Influence of moisture on physical properties**. Virginia: Polytechnic Inst. Dep. of Wood Science and Forest Product, 1995. 227 p.

SIMPSON, W.; TENWOLDE, A. **Physical Properties and Moisture Relations of Wood**, in Wood handbook Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. (Chapter 3), p.463, 1999.

SIVONEN, H.; MAUNU, L.S.; SUNDHOLM, F.; JAMSA, S.; VIITANIEMI, P. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. **Holzforschung**, v.56, n.6, p.648–653, 2002.

SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry Fundamentals and applications**. Academic Press, Inc. London, UK, 1993. 293 p.

SKAAR, C.J. **Water in Wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218 p.

SOMBOON, P.; NIEMINEN, K.; PAULAPURO, H. Finite element analysis of the fatigue behavior of wood fiber cell walls. **BioResources**. v. 3, n. 4, p.983 – 994, 2008.

STAMM, A.J. Thermal Degradation of Wood and Cellulose **Forest Products Laboratory, Forest Service**, Lr. S. Department of Agriculture, Madison, Wis. Ind. Eng. Chemical, v.48, n.3 ,p.413–417, 1956.

STALNAKER, J.J.; HARRIS, E.C. **Structural design in wood**, Intrenational Thomsom, Publishing, 1997. 448 p.

SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation in wood during heating**, Doctoral Thesis. Lulea University of Technology. 2004. 50 p.

SZÜCS, C.A. et. al. **Proposta em Ensaio para Cisalhamento Paralelo às Fibras da Madeira**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1998, Departamento de Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Catrina, Florianópolis, v.1, 1998. P. 135–142.

SZÜCS, C.A. Relatório técnico final. **Caracterização da madeira de reflorestamento do estado, inovação tecnológica e desenvolvimento de produtos de madeira**. Fevereiro, 2005. 52 p.

TAKAMURA, N.J. Heat treatment of Wood. **Japan Wood Research Society**, v.14, n.4, p.75–83, 1968.

TANG, W.K. Effect of flame-retardants on pyrolysis and combustion of  $\alpha$  cellulose. **Journal Polymeric Science**, v.6, p.65–81, 1964.

TANG, W.K. Effect of inorganic salts on pyrolysis of wood, alpha-cellulose, and lignin determined by dynamic thermogravimetry. **Forest Products Laboratory**. Madison, Wisconsin, v.71, p.16–22, 1967.

TANG, R.C.; ADAMS, S.F.; MARK, R.E. Modulus of rigidity and torsional strength of Scarlet oak related to moisture content. **Wood and Science**, v.3, n.4, p.238–244, 1971.

TEISCHINGER, A. **Effect of different drying temperatures on selected physical wood properties**, In: Proc. 3rd IUFRO WOOD DRYING CONFERENCE, 1992, Vienna, 1992. P. 211–216.

TENWOLDE, A.; DOBBIN, J.M.; KRAHN, L. **Thermal properties of wood and wood Panel products for use in buildings**, United States Department of Agriculture Forest Service Forest Products Laboratory Madison, Wisconsin, 1988. 57p

TERZIEV, N.; DANIEL, G. Industrial kiln drying and its effect on microstructure, impregnation and properties of Scots pine timber impregnated above ground use. Part 2. Effect of drying on microstructure and some mechanical properties of Scots pine wood. **Holzforschung**, v.56, p.434–439, 2002.

THEANDER, O.; BJURMAN, J.; BOUTELJE, J.B. Increase in the content of low-molecular carbohydrates at lumber surfaces during drying and correlations with nitrogen content, yellowing and mould growth. **Wood Science and Technology**, v.27, p.381–389, 1993.

THIAM, M.; MILOTA, M.R.; LEICHTI, R. Effect of high-temperature drying on bending and shear strengths of western hemlock lumber, **Forest Product Journal** v.52, n.4, p.64–68, 2002.

THOMAS, G.C.; BUCHANAN, A.H. **In Proceeding of the Fourth International FIRE and Materials**. In: CONFERENCE; MARRIOT

HOTEL, CRYSTAL CITY VIRGINIA, USA, JOHN WILEY E SONS LTD, CHICHESTER, 1995.

THOMPSON, W.S. Effect of steaming and kiln drying on the properties of Southern pine poles, **Forest Product Journal**, v.19, n.1, p.21–28, 1969.

THOMSON, W.S.; STEVEN, R.R. Influence of thermal treatment on the mechanical and chemical properties of wood: A review of research at the Mississippi forest products laboratory. Proceedings of research conference on: High temperature drying effects on mechanical properties of softwood lumber, **Springfield**, USA, 1976.

THUVANDER, F.; WALLSTRÖM, L.; BERGLUND, L.A.; LINDBERG, K.A.H. Effects of an impregnation procedure for prevention of wood cell wall damage due to drying, **Journal Wood Science Technology**, v.34, p.473–480, 2001.

TJEERDSMA, B.F.; BOONSTRA, M.; MILITZ, H. **Thermal modification of non durable wood species.2 Improved wood properties of thermally treated wood**. In: PROCEEDING OF INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION 29TH ANNUAL MEETING IRG/WP, 1998. P. 98-124.

TJEERDSMA, B.F.; BOONSTRA, M.; PIZZLI, A.; TEKELY, P.; MILITZ, H. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v.56, p.149–153, 1998.

TSOUMIS, G. Structure, properties, utilization. **Science and technology of wood** New York: Van Nostrand Reinhold, 1991, 494p.

VALENTE, A.F.; LELLES, J.G. Carbonização da Madeira de Eucalyptus. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.141, p.74–79, 1986.

VAN KREVELEN, D.W.; VAN HEERDEN, C.; HUNTICNS, F.J. Physiochemical aspects of the pyrolysis of coal and related organic compounds, Netherlands, **Fuel**, v.30, p.253–259, 1951.

VAN ZEELAND, I.M.; SALINAS, J.J.; MEHAFFEY, J.R. Compressive strength of lumber at high temperatures. **Fire and materials**, v.29, p.71–90, 2005.

VIITANEIMI, P. **Thermo wood Modified Wood for Improved Performance**. In: Proceedings of wood the ecological material. In: THE 4<sup>TH</sup> EUROWOOD SYMPOSIUM. STOCKHOLM, 1997, Sweden, Sep 22–23 Trätek rapport 9709084, 1997. P. 67–69.

VIITANIEMI, P.; JASMA, S. Modification of wood with heat treatment. **VTT research report publications. Espor**, VTT Finland, 1994.

VIITANIEMI, P; JÄMSÄ, S. **Heat treatment of wood better durability without chemicals in:** In: REVIEW ON HEAT TREATMENTS OF WOOD. PROCEEDINGS OF SPECIAL SEMINAR, 2001, Cost Action E22 Edited by A.O. Rapp, 2001. P. 21–26.

WANGAARD, I.I. A new approach to the determination of fiber saturation point from mechanical testing **Forest Product Journal**, v.7, n.11, p.410–416, 1957.

WEILAND, J.J.; GUYONNET, R.E. Etude Physico-chimique d'un traitement thermique du bois. **Récents Progrès en Génie des Procèdes**, v.15, n.88, p.195–202, 2001.

WESTERMARK, U.; SAMUELSSON, B.; LUNDQVIST, K. Homolytic cleavage of the  $\beta$ -ether bond in phenolic  $\beta$ -O-4 structures in wood lignin and guaiacylglycerol- $\beta$ -guaiacyl ether. Research on Chemical Intermediates. VSP Int. Sci. Publ., **Zeist, Netherlands**, v.21, p.343, 1995.

WHITE, R.H. **Charring Rates of Different Wood Species**. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Forestry), University of Wisconsin, Madison, USA, 1988.

WHITE, R.H. **Fire Endurance**. Research Forest Products Technologist, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI 1990.

WHITE, R.H. **Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members** Section 4/Chapter 11 The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Third Edition, 2002.

WHITE, R.H. e TRAN, H.C. **Charring Rate of Wood Exposed to a Constant Heat Flux**. Wood & fire safety 3rd International Scientific Conference the high tatras, hotel patria. Slovak Republic, 2003.

WHITE, R.H **Fire Resistance of Structural Composite Lumber Products**. Department of Agriculture Forest Service Forest Products Laboratory Research Paper FPL–RP–633 United States, 2006.

WIKBERG, H.; MAUNU, S.L. Characterization of thermally modified hard and softwoods by <sup>13</sup>C CPMAS NMR. **Carbohydrate Polymers**, v.58, p.461–466, 2004.

WINANDY, J.E.; ROWELL, R.M. **The Chemistry of Wood Strength**. In: Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. Boca Raton, 2005.

YANO, S.; HATAKEYAMA, H.; HATAKEYAMA, T.J. Dynamic viscoelasticity and structural changes of regenerated cellulose during water sorption. **Applied. Polymeric Science**, v.20, p.3221, 1976.

YANG, J.M.; GORING, D.A.I. The phenolic hydroxyl content of lignin in spruce wood. **Canadian. Journal. Chemical**, v.58, p.2411–2414, 1980.

YAO, J.; TAYLOR, F. Effect of high temperature drying on the strength of Southern Pine dimension lumber, **Forest Products Journal**, v.29, n. 8, 49–51, 1979.

YEO, S.C.; EISENBERG, A.J. Macro molecular. **Journal of Applied Polymer Science**, v.13, n.3, p.441, 1977.

YILDIZ, S.; GÜMÜSKAYA, E. The effects of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood. **Building and Environment**, v.42, p.62–67, 2007.

YILDIZ, S.; GEZER E.D.; YILDIZ U.C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, n.41, p.1762–1766, 2006.

YOUNG, S.A.; CLANCY, P. Compression Mechanical Properties of Wood at Temperatures Simulating Fire Conditions. **Fire and Materials**, v.25, p.83–93, 2001.

ZERONIAN, S.H.; MENEFEER, E. Thermally-induced changes in the mechanical properties of ramie and chemically-modified ramie **Journal Applied Polymeric Science**, v.28, p.869, 1976.

ZHOU, H.; SMITH, I. Influences of drying treatments on bending properties of plantation-growth white spruce, **Forest Product Journal**, v.41, n.2, p.8–14, 1991.

## 7 APÊNDICES

### Apêndice 1: Teor de umidade dos corpos de prova.

**Tabela 37:** Valores médios de teor de umidade do *Pinus taeda*.

Temperatura (°C)	Teor de umidade (%)				
	$f_{c,0}$	$f_{m,0}$	$f_{v,0}$	$f_{e0,0}$	$f_{e90,0}$
20	12,76	13,28	12,17	12,76	11,99
40	11,43	9,42	9,87	10,13	9,38
50	10,25	8,06	8,77	8,88	8,34
60	9,53	6,89	7,64	7,77	6,92
70	8,37	4,01	6,12	6,33	5,09
80	7,24	3,28	5,83	5,56	4,32
90	5,89	3,01	3,04	3,00	2,77
100	5,05	2,03	1,52	2,38	1,84
110	3,83	1,36	0,22	1,19	0,62
130	1,43	0,82	0,15	0,25	0,22
150	0,39	0,22	0,15	0,15	0,15
170	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
190	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
210	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
230	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Tabela 38:** Valores médios de teor de umidade do *Eucalyptus saligna*.

Temperatura (°C)	Teor de umidade (%)				
	$f_{c,0}$	$f_{m,0}$	$f_{v,0}$	$f_{e0,0}$	$f_{e90,0}$
20	12,31	12,72	12,67	12,60	12,51
40	10,49	11,10	11,69	10,37	11,17
50	9,38	9,93	10,28	9,50	10,12
60	8,99	9,37	9,44	9,45	9,72
70	8,62	8,30	7,86	8,35	8,74
80	7,34	7,25	6,77	7,44	7,76
90	6,37	6,36	6,70	6,20	6,50
100	5,50	5,45	5,10	4,90	5,28
110	4,39	3,87	3,91	3,04	2,76
130	3,56	2,94	3,14	2,45	2,17
150	0,74	0,22	0,24	1,05	0,44
170	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
190	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
210	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
230	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



**Tabela 39:** Valores médios de teor de umidade do *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Teor de umidade (%)				
	$f_{c,\theta}$	$f_{t,\theta}$	$f_{v,\theta}$	$f_{e0,\theta}$	$f_{e90,\theta}$
20	11,65	11,60	11,63	11,74	11,79
40	11,35	8,76	9,87	9,89	9,42
50	10,54	7,09	8,51	8,33	7,83
60	8,04	6,71	7,49	7,86	7,07
70	7,17	5,31	6,82	7,13	6,37
80	6,79	5,22	6,13	6,23	5,48
90	5,30	4,32	4,22	5,35	4,49
100	4,51	2,54	3,80	4,11	3,80
110	3,50	2,04	2,72	3,35	2,65
130	2,12	0,61	0,41	1,31	1,06
150	0,26	0,20	0,21	0,31	0,12
170	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
190	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
210	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
230	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Apêndice 2:** Resistência normalizada em função da massa específica**Apêndice 2-1:** *Pinus taeda***Tabela 40:** Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do *Pinus taeda*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}\text{C}}$
20	373,86	1,0	423,40	1,0
	384,03	1,0	432,70	1,0
	395,88	1,0	447,07	1,0
	408,53	1,0	453,88	1,0
	416,88	1,0	462,10	1,0
40	381,74	0,88	429,66	0,93
	392,36	0,88	444,00	0,86
	403,50	0,93	451,86	0,86
	416,18	0,93	459,52	0,86
	420,29	0,93	473,66	0,86
50	373,49	0,85	423,40	0,98
	383,74	0,85	432,65	0,98
	395,77	0,85	446,46	0,85
	406,32	0,98	453,74	0,85
	416,76	0,98	460,67	0,85
60	382,11	0,80	430,44	0,88
	394,08	0,80	444,06	0,78
	403,81	0,88	451,91	0,78
	416,20	0,88	459,75	0,78
	421,74	0,88	473,40	0,76
70	370,86	0,71	423,12	0,74
	383,19	0,71	430,46	0,74
	395,22	0,71	445,61	0,70
	403,92	0,74	453,42	0,70
	416,61	0,74	459,90	0,70
80	371,79	0,66	423,28	0,68
	383,27	0,66	431,39	0,68
	395,61	0,66	445,76	0,69
	405,43	0,68	453,57	0,69
	416,72	0,68	460,59	0,69
90	379,77	0,60	429,07	0,56
	390,41	0,60	439,84	0,55
	397,53	0,60	450,85	0,55
	414,86	0,56	457,79	0,55
	419,76	0,56	470,94	0,55
100	376,17	0,63	425,89	0,63
	384,77	0,63	432,76	0,63
	396,17	0,63	448,03	0,53
	409,39	0,63	454,41	0,53
	417,77	0,63	463,54	0,53
	373,86	1,0	423,40	1,0

**Tabela 41:** Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do *Pinus taeda* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}C}$
110	377,37	0,75	425,94	0,73
	385,58	0,75	432,86	0,73
	396,19	0,75	448,74	0,62
	410,72	0,73	454,51	0,62
	417,85	0,73	464,84	0,62
130	378,51	0,79	427,59	0,82
	387,78	0,79	433,39	0,82
	396,25	0,79	449,37	0,69
	411,67	0,82	456,09	0,69
	418,85	0,82	469,71	0,69
150	377,46	0,88	426,20	0,77
	387,74	0,88	432,96	0,77
	396,20	0,88	449,02	0,67
	411,20	0,77	454,73	0,67
	418,03	0,77	467,21	0,67
170	381,06	0,70	429,47	0,73
	391,91	0,70	443,54	0,68
	400,53	0,73	451,31	0,68
	415,72	0,73	458,99	0,68
	420,22	0,73	471,63	0,68
190	379,14	0,73	428,10	0,72
	388,83	0,73	437,92	0,67
	397,09	0,73	450,07	0,67
	414,52	0,72	456,64	0,67
	419,54	0,72	475,35	0,67
210	379,10	0,59	427,66	0,55
	388,82	0,59	433,62	0,55
	396,32	0,59	449,93	0,56
	413,91	0,55	456,42	0,56
	418,89	0,55	475,76	0,56
230	380,49	0,40	429,31	0,39
	390,52	0,40	442,52	0,36
	399,62	0,40	451,04	0,36
	414,89	0,39	457,95	0,36
	419,83	0,39	475,23	0,35

**Tabela 42:** Resistência normalizada à flexão estática e massa específica do *Pinus taeda*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{m,0}/\bar{f}_{m,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{m,0}/\bar{f}_{m,20^{\circ}\text{C}}$
20	372,91	1,00	438,90	1,00
	381,13	1,00	456,48	1,00
	396,22	1,00	466,80	1,00
	410,76	1,00	486,89	1,00
	423,06	1,00	509,44	1,00
40	366,39	0,76	423,80	0,78
	373,83	0,76	440,26	0,82
	382,28	0,76	456,75	0,82
	396,92	0,76	467,96	0,82
	411,58	0,78	487,63	0,80
50	369,14	0,85	433,53	0,89
	378,08	0,85	448,19	0,92
	388,81	0,85	462,10	0,92
	403,64	0,89	480,80	0,86
	415,50	0,89	501,20	0,86
60	369,00	0,79	432,11	0,78
	377,86	0,79	447,75	0,83
	386,81	0,79	461,68	0,83
	403,04	0,78	480,35	0,84
	415,18	0,78	500,63	0,84
70	369,98	0,81	434,04	0,74
	379,48	0,81	451,61	0,80
	393,61	0,81	465,56	0,80
	409,29	0,74	485,29	0,80
	419,66	0,74	505,03	0,80
80	366,42	0,83	424,30	0,80
	373,98	0,83	440,67	0,89
	383,50	0,83	457,82	0,89
	397,07	0,83	472,77	0,81
	411,77	0,80	488,00	0,81
90	366,74	0,83	426,21	0,80
	374,83	0,83	441,19	0,85
	383,71	0,83	459,45	0,85
	399,60	0,83	476,15	0,88
	413,00	0,80	494,23	0,88
100	371,36	0,83	436,22	0,82
	380,15	0,83	453,75	0,82
	394,04	0,83	466,40	0,82
	410,18	0,78	486,44	0,81
	420,53	0,78	506,66	0,81
	372,91	1,00	438,90	1,00

**Tabela 43:** Resistência normalizada à flexão estática e massa específica do *Pinus taeda* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{m,0}/\bar{f}_{m,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{m,0}/\bar{f}_{m,20^{\circ}C}$
110	366,69	0,80	425,73	0,79
	374,30	0,80	440,74	0,78
	383,66	0,80	458,63	0,78
	398,74	0,80	475,09	0,82
	411,99	0,79	493,70	0,82
130	370,90	0,84	435,24	0,84
	379,91	0,84	453,24	0,84
	393,72	0,84	466,14	0,84
	409,99	0,80	485,33	0,81
	420,16	0,80	505,68	0,81
150	367,11	0,83	426,32	0,81
	374,97	0,83	441,71	0,85
	384,36	0,83	460,08	0,85
	401,33	0,81	478,84	0,78
	413,39	0,81	495,06	0,78
170	369,75	0,61	433,89	0,69
	379,22	0,61	451,03	0,68
	392,73	0,61	464,44	0,68
	408,70	0,69	481,27	0,60
	417,53	0,69	503,94	0,60
190	367,68	0,52	431,17	0,46
	375,39	0,52	441,87	0,48
	384,44	0,52	460,10	0,48
	402,28	0,46	480,00	0,55
	413,61	0,46	499,66	0,55
210	369,43	0,41	433,61	0,39
	379,07	0,41	451,01	0,42
	391,36	0,41	463,54	0,42
	407,31	0,39	481,08	0,50
	416,56	0,39	503,84	0,50
230	368,17	0,36	431,57	0,34
	375,98	0,36	446,54	0,38
	386,75	0,36	460,96	0,38
	402,54	0,34	480,33	0,33
	414,50	0,34	500,23	0,33

**Tabela 44:** Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do *Pinus taeda*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{V0,0}/\bar{f}_{V0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{V0,0}/\bar{f}_{V0,20^{\circ}\text{C}}$
20	365,17	1,00	438,19	1,00
	393,14	1,00	453,36	1,00
	407,63	1,00	466,82	1,00
	416,49	1,00	482,69	1,00
	426,67	1,00	494,44	1,00
40	384,86	0,85	447,38	0,87
	399,37	0,85	462,45	0,87
	412,71	1,08	476,63	1,01
	424,12	1,08	489,48	1,01
	436,53	0,87	512,52	1,01
50	387,19	0,74	449,91	0,87
	401,12	1,18	462,93	0,87
	413,13	1,18	479,25	0,67
	425,61	1,18	491,65	0,67
	437,73	0,87	503,34	0,67
60	373,93	0,81	438,59	0,66
	394,03	0,81	453,43	0,66
	408,36	0,97	468,29	0,66
	418,62	0,97	484,47	0,78
	426,88	0,97	494,74	0,78
70	369,33	0,69	438,12	0,64
	392,71	0,69	452,74	0,64
	406,84	0,89	465,01	0,64
	414,21	0,89	480,73	0,80
	426,53	0,89	494,03	0,80
80	380,88	0,72	440,37	0,70
	395,81	0,72	456,62	0,70
	410,11	1,09	469,80	0,70
	419,97	1,09	485,70	0,91
	427,56	1,09	497,75	0,91
90	383,13	0,78	444,38	0,82
	397,02	0,78	457,91	0,82
	411,36	0,99	473,41	0,65
	421,78	0,99	486,32	0,65
	431,80	0,99	507,47	0,65
100	385,02	0,69	447,85	0,70
	399,95	0,69	462,81	0,70
	412,92	0,97	478,67	0,88
	424,51	0,97	490,62	0,88
	437,48	0,70	516,52	0,88
	365,17	1,00	438,19	1,00

**Tabela 45:** Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do *Pinus taeda* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}C}$
110	388,84	0,77	451,09	0,74
	401,86	1,01	464,65	0,74
	413,15	1,01	480,32	0,79
	426,01	1,01	493,12	0,79
	437,96	0,74	510,70	0,79
130	384,40	0,72	445,58	0,63
	397,75	0,72	460,23	0,63
	412,47	0,90	474,58	0,71
	423,21	0,90	488,61	0,71
	434,38	0,90	508,54	0,71
150	381,59	0,65	441,29	0,55
	396,95	0,65	457,64	0,55
	411,00	0,80	471,11	0,67
	421,26	0,80	485,73	0,67
	428,32	0,80	506,40	0,67
170	375,54	0,51	439,23	0,49
	394,92	0,51	455,10	0,49
	409,18	0,68	468,44	0,49
	418,89	0,68	484,77	0,45
	427,30	0,68	495,09	0,45
190	383,47	0,35	444,91	0,31
	397,18	0,35	458,20	0,31
	411,58	0,45	473,78	0,42
	422,93	0,45	487,68	0,42
	433,85	0,45	508,45	0,42
210	378,31	0,30	438,07	0,29
	390,85	0,30	451,57	0,29
	403,73	0,37	464,73	0,29
	413,74	0,37	480,45	0,33
	426,17	0,37	493,34	0,33
230	384,44	0,30	446,68	0,29
	398,30	0,30	462,03	0,29
	412,55	0,32	475,52	0,42
	423,87	0,32	489,44	0,42
	434,75	0,32	509,60	0,42

**Tabela 46:** Resistência normalizada ao embutimento paralelo às fibras e massa específica do *Pinus taeda*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}\text{C}}$
20	387,88	1,00	432,98	1,00
	397,43	1,00	439,18	1,00
	408,89	1,00	449,52	1,00
	419,46	1,00	460,49	1,00
	425,60	1,00	471,54	1,00
40	385,57	0,71	432,88	0,74
	395,40	0,71	438,19	0,73
	407,93	0,74	448,77	0,73
	417,57	0,74	460,08	0,73
	425,37	0,74	471,30	0,73
50	375,47	0,72	432,16	0,74
	388,22	0,72	436,38	0,74
	403,25	0,74	445,92	0,74
	416,02	0,74	458,91	0,74
	423,81	0,74	468,14	0,74
60	388,04	0,72	436,29	0,75
	402,49	0,74	445,23	0,75
	415,78	0,74	458,10	0,73
	422,34	0,74	466,18	0,74
	431,49	0,74	480,53	0,72
70	386,56	0,72	435,26	0,79
	400,45	0,76	442,49	0,79
	415,10	0,76	455,99	0,79
	421,69	0,76	465,22	0,79
	428,86	0,76	479,48	0,78
80	385,07	0,74	434,75	0,77
	400,06	0,77	440,64	0,81
	411,68	0,77	455,60	0,81
	420,96	0,77	463,99	0,81
	427,48	0,77	478,35	0,78
90	386,51	0,76	435,02	0,76
	400,31	0,71	440,83	0,76
	414,16	0,71	455,86	0,76
	421,03	0,71	465,10	0,76
	427,72	0,71	479,43	0,72
100	383,12	0,72	433,76	0,71
	397,96	0,72	439,30	0,72
	409,72	0,71	451,83	0,72
	420,15	0,71	461,01	0,72
	425,85	0,71	475,02	0,73
	387,88	1,00	432,98	1,00



**Tabela 47:** Resistência normalizada ao embutimento paralelo às fibras e massa específica do *Pinus taeda* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}C}$
110	387,36	0,68	435,54	0,63
	401,77	0,68	444,19	0,63
	415,43	0,68	457,19	0,63
	421,95	0,68	465,44	0,63
	430,28	0,62	479,59	0,62
130	384,04	0,77	434,16	0,78
	398,81	0,77	439,62	0,78
	411,02	0,78	454,92	0,78
	420,63	0,78	461,93	0,78
	426,91	0,78	476,21	0,77
150	384,84	0,93	432,55	0,91
	393,97	0,93	437,79	0,92
	407,57	0,91	447,19	0,92
	417,13	0,91	459,46	0,92
	424,62	0,91	470,70	0,93
170	383,70	0,86	433,88	0,85
	398,61	0,86	439,32	0,86
	410,67	0,85	453,06	0,86
	420,17	0,85	461,18	0,86
	426,70	0,85	475,36	0,86
190	384,50	0,84	434,61	0,86
	399,81	0,84	440,13	0,89
	411,13	0,86	455,40	0,89
	420,66	0,86	462,93	0,89
	427,00	0,86	477,50	0,88
210	381,93	0,68	433,59	0,68
	397,73	0,68	439,28	0,70
	409,28	0,68	451,35	0,70
	419,60	0,68	460,58	0,70
	425,65	0,68	472,56	0,69
230	381,52	0,51	432,26	0,53
	390,26	0,51	437,16	0,53
	406,09	0,53	446,77	0,53
	416,39	0,53	459,36	0,53
	423,95	0,53	468,78	0,53

**Tabela 48:** Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do *Pinus taeda*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}\text{C}}$
20	387,23	1,00	432,16	1,00
	393,74	1,00	442,93	1,00
	403,20	1,00	456,84	1,00
	408,58	1,00	481,16	1,00
	421,89	1,00	491,90	1,00
40	387,84	0,80	432,25	0,83
	394,24	0,80	443,08	0,81
	403,47	0,83	453,00	0,81
	408,99	0,83	470,73	0,83
	423,05	0,83	488,51	0,83
50	368,44	0,80	424,19	0,83
	388,05	0,80	433,07	0,83
	395,81	0,80	444,75	0,85
	404,48	0,83	462,43	0,85
	409,99	0,83	487,28	0,82
60	385,50	0,78	431,23	0,82
	392,49	0,78	442,02	0,79
	401,79	0,82	452,91	0,79
	407,86	0,82	479,04	0,79
	418,89	0,82	501,49	0,79
70	380,52	0,82	428,33	0,83
	390,93	0,82	441,68	0,88
	399,69	0,82	450,55	0,88
	407,00	0,83	473,81	0,85
	416,98	0,83	500,02	0,85
80	382,90	0,68	430,99	0,71
	392,15	0,68	441,86	0,73
	400,65	0,71	452,30	0,73
	407,25	0,71	478,04	0,69
	418,48	0,71	491,26	0,69
90	386,39	0,78	431,96	0,84
	392,68	0,78	442,66	0,82
	403,14	0,84	454,71	0,82
	407,98	0,84	479,58	0,79
	420,02	0,84	537,81	0,79
100	369,81	0,73	424,87	0,80
	388,27	0,73	436,15	0,83
	395,82	0,73	445,25	0,83
	405,22	0,80	465,06	0,83
	411,11	0,80	487,46	0,71
	387,23	1,00	432,16	1,00

**Tabela 49:** Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do *Pinus taeda* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m³)	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m³)	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}C}$
110	378,34	0,56	428,02	0,54
	390,63	0,56	439,17	0,58
	398,03	0,56	448,95	0,58
	405,90	0,54	469,33	0,58
	414,10	0,54	495,56	0,55
130	382,22	0,74	430,78	0,82
	391,10	0,74	441,77	0,85
	400,53	0,82	451,88	0,85
	407,02	0,82	475,61	0,76
	417,11	0,82	493,70	0,76
150	373,89	0,79	427,86	0,81
	389,88	0,79	437,91	0,81
	397,47	0,79	447,83	0,81
	405,55	0,81	467,89	0,81
	411,69	0,81	490,31	0,78
170	379,44	0,79	428,08	0,89
	390,66	0,79	439,50	0,83
	398,10	0,79	449,74	0,83
	406,50	0,89	470,43	0,80
	414,75	0,89	502,92	0,80
190	365,44	0,41	423,12	0,43
	388,00	0,41	432,35	0,43
	395,00	0,41	444,24	0,44
	404,23	0,43	461,90	0,44
	409,92	0,43	485,68	0,42
210	373,15	0,47	427,53	0,47
	389,47	0,47	436,68	0,46
	396,34	0,47	446,64	0,46
	405,29	0,47	467,69	0,46
	411,12	0,47	489,43	0,45
230	379,62	0,48	428,17	0,50
	390,89	0,48	440,67	0,51
	399,12	0,48	449,96	0,51
	406,78	0,50	470,91	0,49
	415,82	0,50	488,67	0,49

Apêndice 2-2: *Eucalyptus saligna***Tabela 50:** Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do *Eucalyptus saligna*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}\text{C}}$
20	650,68	1,00	784,61	1,00
	663,29	1,00	799,69	1,00
	686,39	1,00	809,65	1,00
	737,62	1,00	818,40	1,00
	749,16	1,00	830,58	1,00
40	644,17	0,78	765,89	0,81
	655,84	0,78	792,91	0,81
	672,10	0,78	802,26	0,78
	691,76	0,78	813,23	0,78
	742,10	0,78	822,77	0,78
50	645,54	0,76	769,34	0,76
	656,88	0,76	793,58	0,76
	675,44	0,75	803,08	0,78
	693,37	0,75	813,97	0,78
	744,17	0,75	824,46	0,78
60	650,34	0,70	782,21	0,68
	662,05	0,70	799,66	0,68
	681,41	0,70	808,84	0,68
	736,47	0,71	816,53	0,68
	748,90	0,71	830,45	0,68
70	647,70	0,65	781,01	0,59
	661,37	0,65	796,69	0,59
	678,18	0,65	804,85	0,63
	735,65	0,62	816,06	0,63
	747,67	0,62	829,89	0,63
80	651,16	0,62	786,48	0,56
	664,54	0,62	799,72	0,56
	686,90	0,62	811,43	0,57
	738,38	0,60	819,82	0,57
	750,85	0,60	831,26	0,57
90	650,02	0,55	782,14	0,47
	661,43	0,55	797,81	0,47
	680,52	0,55	805,35	0,47
	736,29	0,53	816,29	0,47
	748,51	0,53	830,06	0,47
100	646,80	0,45	777,76	0,43
	659,67	0,45	794,68	0,43
	676,13	0,45	803,86	0,43
	734,69	0,44	814,91	0,43
	746,46	0,44	827,34	0,43
	650,68	1,00	784,61	1,00

**Tabela 51:** Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do *Eucalyptus saligna* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}C}$
110	639,78	0,38	754,11	0,37
	651,38	0,38	788,97	0,37
	666,84	0,38	799,81	0,37
	687,26	0,38	811,85	0,39
	738,91	0,38	820,61	0,39
130	647,39	0,49	778,88	0,48
	660,57	0,49	794,77	0,48
	677,33	0,49	804,68	0,47
	735,02	0,50	815,30	0,47
	747,15	0,50	829,02	0,47
150	640,30	0,43	758,17	0,41
	652,55	0,43	789,43	0,41
	667,23	0,43	799,99	0,41
	687,63	0,43	812,52	0,42
	740,21	0,43	821,16	0,42
170	646,26	0,43	774,26	0,41
	657,43	0,43	794,27	0,41
	675,46	0,43	803,63	0,40
	730,15	0,42	814,09	0,40
	744,86	0,42	825,87	0,40
190	645,53	0,50	768,64	0,48
	656,77	0,50	793,08	0,48
	674,84	0,50	802,52	0,47
	692,67	0,50	813,45	0,47
	742,55	0,48	823,07	0,47
210	643,63	0,48	760,49	0,48
	653,06	0,48	790,39	0,48
	667,35	0,48	800,53	0,47
	687,76	0,48	812,78	0,47
	741,49	0,43	821,20	0,47
230	644,02	0,34	763,85	0,33
	653,65	0,34	791,51	0,33
	669,81	0,34	800,63	0,34
	690,22	0,34	812,80	0,34
	742,02	0,34	821,51	0,34

**Tabela 52:** Resistência normalizada à flexão estática e massa específica do *Eucalyptus saligna*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{m,0}/\bar{f}_{m,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{m,0}/\bar{f}_{m,20^{\circ}\text{C}}$
20	740,87	1,00	780,28	1,00
	748,04	1,00	785,06	1,00
	755,77	1,00	792,39	1,00
	763,89	1,00	806,25	1,00
	774,11	1,00	816,36	1,00
40	742,03	0,93	781,27	0,94
	748,48	0,93	785,42	0,94
	757,61	0,94	793,46	0,94
	765,86	0,94	808,52	0,91
	774,81	0,94	919,71	0,91
50	736,83	0,91	778,15	0,89
	744,36	0,91	783,07	0,89
	752,07	0,89	788,62	0,89
	760,87	0,89	798,67	0,89
	767,86	0,89	809,07	0,89
60	735,40	0,82	777,15	0,82
	743,77	0,82	782,42	0,82
	751,24	0,82	788,10	0,82
	759,24	0,82	797,77	0,82
	767,21	0,82	803,62	0,88
70	739,82	0,71	779,85	0,73
	746,34	0,71	783,95	0,73
	754,74	0,73	791,88	0,73
	763,28	0,73	802,03	0,71
	773,65	0,73	813,14	0,71
80	740,01	0,79	780,21	0,77
	746,58	0,79	784,65	0,77
	755,16	0,77	792,14	0,77
	763,38	0,77	805,61	0,78
	773,73	0,77	814,65	0,78
90	739,77	0,71	779,85	0,72
	746,16	0,71	783,80	0,72
	754,68	0,72	791,64	0,72
	763,16	0,72	799,76	0,72
	773,27	0,72	812,48	0,71
100	734,16	0,69	776,53	0,65
	743,30	0,69	781,80	0,65
	750,16	0,65	787,53	0,65
	758,69	0,65	796,23	0,65
	766,85	0,65	802,27	0,65
	740,87	1,00	780,28	1,00

**Tabela 53:** Resistência normalizada à flexão estática e massa específica do *Eucalyptus saligna* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{m,0}/\bar{f}_{m,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{m,0}/\bar{f}_{m,20^{\circ}C}$
110	738,50	0,67	779,70	0,67
	745,53	0,67	783,77	0,67
	754,35	0,67	790,38	0,67
	762,97	0,67	799,35	0,67
	772,78	0,67	811,64	0,67
130	733,26	0,71	775,72	0,70
	743,10	0,71	781,63	0,70
	749,90	0,71	786,48	0,70
	758,57	0,70	793,79	0,70
	766,68	0,70	800,04	0,70
150	742,53	0,61	781,56	0,61
	748,97	0,61	785,57	0,61
	758,31	0,61	793,76	0,61
	766,37	0,61	809,78	0,61
	775,22	0,61	820,58	0,61
170	735,80	0,53	777,71	0,53
	744,28	0,53	782,75	0,53
	751,80	0,53	788,22	0,53
	760,67	0,53	798,46	0,53
	767,60	0,53	808,21	0,53
190	741,14	0,53	781,26	0,53
	748,05	0,53	785,32	0,53
	756,39	0,53	792,49	0,53
	764,45	0,53	808,13	0,55
	774,47	0,53	818,84	0,55
210	738,15	0,38	778,41	0,35
	744,77	0,38	783,28	0,35
	754,20	0,35	788,98	0,35
	762,58	0,35	798,73	0,35
	771,33	0,35	810,10	0,35
230	735,70	0,28	777,56	0,27
	744,20	0,27	782,57	0,27
	751,64	0,27	788,18	0,27
	759,29	0,27	797,81	0,27
	767,26	0,27	804,22	0,29

**Tabela 54:** Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do *Eucalyptus saligna*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}\text{C}}$
20	667,20	1,00	797,56	1,00
	703,60	1,00	817,88	1,00
	727,46	1,00	834,25	1,00
	754,64	1,00	849,29	1,00
	777,17	1,00	871,04	1,00
40	680,08	0,90	804,13	0,78
	710,14	0,90	823,39	0,78
	739,15	0,90	838,27	0,78
	756,94	0,90	851,35	0,77
	782,88	0,90	882,47	0,77
50	658,94	0,82	796,39	0,76
	696,31	0,82	816,04	0,73
	722,78	0,71	830,27	0,73
	748,65	0,71	845,93	0,73
	775,77	0,76	863,00	0,73
60	676,28	0,68	803,91	0,59
	708,51	0,68	822,40	0,59
	736,26	0,68	835,70	0,59
	755,46	0,64	850,83	0,59
	782,05	0,64	874,49	0,59
70	674,20	0,63	803,55	0,57
	706,11	0,63	822,09	0,57
	735,51	0,63	835,65	0,57
	755,43	0,57	850,01	0,62
	781,33	0,57	872,45	0,62
80	654,75	0,71	793,72	0,57
	689,54	0,71	812,39	0,59
	721,91	0,56	826,65	0,59
	744,68	0,56	845,22	0,59
	774,58	0,57	858,18	0,58
90	667,37	0,66	800,90	0,65
	704,73	0,58	819,93	0,65
	732,63	0,58	835,39	0,65
	755,05	0,51	849,76	0,65
	778,60	0,51	871,40	0,65
100	653,62	0,66	786,43	0,55
	683,82	0,66	809,65	0,56
	720,68	0,65	825,41	0,56
	743,45	0,65	841,08	0,56
	772,80	0,55	856,05	0,56
	667,20	1,00	797,56	1,00



**Tabela 55:** Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do *Eucalyptus saligna* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}C}$
110	652,77	0,55	786,15	0,52
	681,61	0,55	808,96	0,50
	717,09	0,57	825,02	0,50
	741,46	0,57	839,50	0,50
	770,15	0,52	852,09	0,53
130	653,81	0,68	790,47	0,64
	689,52	0,68	811,71	0,51
	721,59	0,69	826,53	0,51
	744,57	0,69	844,55	0,51
	774,12	0,64	856,47	0,51
150	656,34	0,56	795,26	0,54
	691,46	0,56	813,81	0,58
	722,67	0,56	828,72	0,58
	747,97	0,56	845,28	0,58
	775,05	0,54	860,55	0,54
170	666,18	0,52	796,78	0,49
	701,11	0,52	817,63	0,50
	726,32	0,52	831,45	0,50
	749,46	0,52	846,10	0,50
	776,83	0,49	870,77	0,52
190	650,03	0,31	784,50	0,32
	680,35	0,31	805,04	0,35
	715,65	0,30	824,89	0,35
	739,44	0,30	838,82	0,35
	757,41	0,32	851,54	0,31
210	661,33	0,23	796,71	0,23
	697,82	0,23	816,59	0,23
	725,35	0,21	831,42	0,23
	749,30	0,21	845,98	0,23
	776,78	0,23	863,74	0,24
230	652,28	0,20	785,44	0,19
	680,96	0,20	805,23	0,19
	716,37	0,20	824,93	0,16
	739,64	0,20	839,42	0,16
	766,80	0,19	851,85	0,17

**Tabela 56:** Resistência normalizada ao embutimento paralelo às fibras e massa específica do *Eucalyptus saligna*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}\text{C}}$
20	731,42	1,00	809,02	1,00
	738,28	1,00	820,31	1,00
	762,75	1,00	835,83	1,00
	780,80	1,00	847,57	1,00
	795,01	1,00	867,49	1,00
40	735,71	0,88	814,03	0,81
	751,64	0,82	827,91	0,81
	773,90	0,82	843,15	0,81
	788,22	0,82	856,42	0,88
	801,39	0,81	886,22	0,88
50	733,16	0,75	810,58	0,65
	743,37	0,75	822,00	0,65
	769,26	0,68	839,22	0,65
	783,01	0,68	850,90	0,74
	798,61	0,68	875,34	0,74
60	730,13	0,75	804,56	0,72
	737,05	0,75	815,11	0,72
	757,51	0,69	830,21	0,72
	776,32	0,69	844,46	0,72
	789,52	0,69	858,39	0,77
70	734,16	0,65	813,40	0,61
	748,96	0,65	826,70	0,61
	771,09	0,63	841,99	0,61
	787,03	0,63	856,33	0,73
	800,50	0,61	884,42	0,73
80	730,49	0,70	805,57	0,62
	737,86	0,70	817,31	0,62
	759,03	0,65	835,32	0,62
	779,00	0,65	845,16	0,62
	793,75	0,65	863,04	0,63
90	732,13	0,60	809,74	0,62
	738,56	0,60	820,76	0,62
	763,16	0,61	836,67	0,62
	780,81	0,61	847,80	0,62
	795,67	0,61	868,26	0,67
100	730,96	0,55	808,99	0,65
	738,14	0,55	820,10	0,65
	760,64	0,55	835,66	0,65
	779,08	0,55	847,42	0,65
	794,33	0,55	864,10	0,62
	731,42	1,00	809,02	1,00

**Tabela 57:** Resistência normalizada ao embutimento paralelo às fibras e massa específica do *Eucalyptus saligna* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}C}$
110	733,69	0,65	810,81	0,58
	745,45	0,65	822,41	0,58
	770,08	0,60	840,35	0,58
	784,14	0,60	851,98	0,64
	798,68	0,60	876,40	0,64
130	734,15	0,79	812,51	0,75
	746,05	0,79	826,44	0,75
	770,86	0,78	841,61	0,80
	786,33	0,78	856,21	0,80
	800,42	0,75	881,96	0,80
150	733,93	0,75	811,01	0,72
	745,93	0,75	822,85	0,72
	770,69	0,75	840,90	0,72
	784,46	0,75	852,69	0,74
	799,91	0,75	880,53	0,74
170	730,22	0,76	805,36	0,75
	737,76	0,76	816,82	0,75
	758,02	0,76	832,55	0,75
	776,83	0,76	845,12	0,75
	790,26	0,76	858,81	0,76
190	732,88	0,74	810,50	0,70
	742,62	0,74	821,73	0,70
	768,53	0,72	837,58	0,70
	782,87	0,72	850,39	0,72
	798,21	0,72	871,67	0,72
210	732,62	0,61	810,24	0,65
	738,59	0,61	821,48	0,65
	764,80	0,71	836,68	0,65
	782,32	0,71	848,31	0,65
	795,96	0,71	870,88	0,71
230	730,02	0,57	801,84	0,60
	735,73	0,57	814,21	0,60
	754,27	0,60	829,78	0,60
	776,00	0,60	844,34	0,60
	789,11	0,60	856,51	0,65

**Tabela 58:** Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do *Eucalyptus saligna*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}\text{C}}$
20	731,62	1,00	798,68	1,00
	745,82	1,00	818,00	1,00
	760,39	1,00	832,70	1,00
	773,36	1,00	847,76	1,00
	784,61	1,00	867,24	1,00
40	733,27	0,76	804,15	0,78
	751,30	0,74	819,64	0,78
	763,91	0,74	836,06	0,78
	776,04	0,74	851,02	0,75
	789,22	0,74	873,63	0,75
50	717,71	0,70	791,53	0,73
	738,11	0,70	809,62	0,75
	754,06	0,73	825,60	0,75
	767,19	0,73	843,38	0,75
	779,83	0,73	860,64	0,78
60	733,82	0,70	806,09	0,65
	752,23	0,70	821,50	0,65
	764,64	0,70	837,09	0,65
	776,78	0,70	852,42	0,66
	789,28	0,70	883,88	0,66
70	730,86	0,71	795,38	0,68
	742,48	0,71	812,36	0,69
	757,24	0,68	828,23	0,69
	771,08	0,68	846,53	0,69
	780,98	0,68	861,90	0,70
80	732,51	0,64	800,59	0,57
	748,72	0,64	818,76	0,57
	762,95	0,65	833,56	0,57
	773,89	0,65	850,25	0,66
	786,30	0,65	872,70	0,66
90	731,30	0,63	796,03	0,60
	743,88	0,63	816,18	0,61
	758,31	0,60	830,83	0,61
	771,77	0,60	846,57	0,61
	782,07	0,60	863,54	0,61
100	731,62	0,55	798,15	0,55
	744,68	0,55	817,26	0,69
	759,54	0,55	831,63	0,69
	772,71	0,55	847,26	0,69
	782,93	0,55	864,49	0,68
	731,62	1,00	798,68	1,00

**Tabela 59:** Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do *Eucalyptus saligna* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}C}$
110	731,76	0,58	799,24	0,51
	746,60	0,58	818,64	0,56
	760,73	0,51	832,99	0,56
	773,38	0,51	849,25	0,56
	786,03	0,51	871,34	0,61
130	712,48	0,45	789,30	0,46
	733,86	0,45	806,78	0,52
	752,83	0,46	821,84	0,52
	765,30	0,46	837,54	0,52
	776,96	0,46	852,58	0,49
150	716,95	0,72	789,98	0,64
	736,76	0,72	808,70	0,64
	753,60	0,64	822,36	0,64
	766,58	0,64	837,74	0,64
	779,00	0,64	852,79	0,62
170	732,84	0,60	803,13	0,62
	749,23	0,60	819,13	0,62
	763,19	0,54	834,27	0,62
	774,38	0,54	850,86	0,65
	786,48	0,54	873,08	0,65
190	719,47	0,44	791,98	0,50
	738,58	0,44	810,75	0,48
	755,14	0,50	827,80	0,48
	768,41	0,50	843,59	0,48
	780,82	0,50	861,45	0,45
210	717,66	0,60	791,12	0,56
	737,77	0,60	809,30	0,58
	753,74	0,56	824,86	0,58
	766,75	0,56	841,59	0,58
	779,26	0,56	854,14	0,65
230	730,82	0,34	792,38	0,38
	741,46	0,34	811,34	0,45
	756,35	0,38	827,89	0,45
	768,99	0,38	844,12	0,45
	780,93	0,38	861,55	0,42

### Apêndice 2-3: *Schizolobium amazonicum*

**Tabela 60:** Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}\text{C}}$
20	296,61	1,00	370,75	1,00
	341,59	1,00	383,54	1,00
	358,77	1,00	399,71	1,00
			426,29	1,00
40	300,86	0,85	369,28	0,82
	343,16	0,82	384,81	0,84
	357,67	0,82	398,36	0,84
			425,87	0,84
50	301,54	0,88	368,95	0,84
	342,36	0,80	385,48	0,83
	357,11	0,84	399,22	0,83
			425,20	0,83
60	297,67	0,82	379,56	0,79
	337,80	0,80	388,51	0,78
	351,23	0,79	418,36	0,78
	364,28	0,79		
70	296,35	0,82	373,40	0,81
	330,68	0,80	385,77	0,82
	344,98	0,80	411,33	0,82
	358,09	0,81		
80	298,42	0,80	371,79	0,77
	331,72	0,79	383,89	0,78
	344,34	0,79	413,14	0,78
	356,00	0,77		
90	302,88	0,88	369,56	0,82
	330,06	0,82	386,40	0,86
	344,94	0,82	409,56	0,86
	356,63	0,82		
100	303,10	0,78	366,85	0,79
	330,77	0,76	384,09	0,81
	343,29	0,76	409,25	0,81
	355,13	0,79		

**Tabela 61:** Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do *Schizolobium amazonicum* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}C}$
110	304,62	0,83	387,39	0,83
	328,83	0,83	409,29	0,83
	342,31	0,83		
	354,18	0,83		
	364,51	0,83		
130	304,11	0,89	366,72	0,88
	332,46	0,88	389,65	0,89
	343,51	0,88	415,02	0,89
	355,52	0,88		
150	305,12	0,94	368,82	0,87
	330,50	0,96	389,58	0,93
	340,95	0,96	418,73	0,93
	356,73	0,87		
170	306,35	0,89	386,42	0,90
	330,42	0,91	416,21	0,90
	342,26	0,91		
	352,56	0,89		
	364,37	0,89		
190	308,26	0,68	365,49	0,67
	330,73	0,68	386,17	0,66
	343,44	0,68	424,26	0,66
	354,73	0,67		
210	299,35	0,53	373,89	0,53
	318,08	0,53	412,66	0,52
	331,43	0,52		
	342,99	0,52		
	353,53	0,53		
230	295,40	0,37	367,25	0,38
	314,03	0,37	406,67	0,38
	322,70	0,39		
	335,22	0,39		
	350,71	0,38		

**Tabela 62:** Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}\text{C}}$
20	331,70	1,00	384,69	1,00
	348,49	1,00	398,95	1,00
	370,75	1,00	407,39	1,00
			418,62	1,00
40	332,18	0,99	383,76	1,01
	348,06	0,99	398,29	1,01
	369,16	0,98	405,38	1,01
			416,84	1,01
50	331,37	0,96	384,19	0,98
	347,51	0,96	397,34	0,98
	368,67	0,94	404,46	0,98
			415,63	0,98
60	325,57	0,90	378,18	0,91
	343,67	0,90	390,68	0,91
	365,22	0,91	393,11	0,91
			408,60	0,91
70	319,64	0,99	371,11	0,99
	341,04	0,98	382,75	1,06
	359,04	0,99	389,55	1,06
			401,58	1,06
80	320,29	1,06	381,20	1,07
	341,43	1,06	394,07	1,07
	355,73	1,04	399,59	1,07
	368,99	1,04		
90	320,26	0,92	381,07	0,93
	339,46	0,92	391,44	0,93
	356,72	0,94	395,81	0,93
	367,67	0,94		
100	320,02	1,08	378,30	1,11
	339,32	1,08	389,36	1,07
	354,92	1,11	412,99	1,07
	366,52	1,11		
	331,70	1,00	384,69	1,00



**Tabela 63:** Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do *Schizolobium amazonicum* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}C}$
110	320,61	1,10	375,85	1,11
	338,91	1,10	390,18	1,18
	353,87	1,11	411,52	1,18
	368,48	1,11		
130	319,96	0,91	377,98	0,89
	341,82	0,90	390,87	0,93
	354,98	0,89	413,32	0,93
	370,01	0,89		
150	319,85	0,95	380,22	0,96
	339,93	0,98	389,80	0,96
	352,31	0,96	413,22	0,96
	370,76	0,96		
170	318,32	0,71	375,38	0,71
	338,08	0,72	387,23	0,71
	352,81	0,71	410,51	0,71
	367,99	0,71		
190	320,04	0,63	375,55	0,60
	340,39	0,63	386,86	0,60
	354,20	0,59	409,87	0,60
	368,90	0,59		
210	311,42	0,54	374,34	0,52
	328,87	0,53	395,43	0,51
	342,26	0,53		
	357,67	0,52		
230	359,98	0,52		
	304,94	0,39	367,69	0,39
	324,49	0,39	388,90	0,38
	335,26	0,39		
	349,56	0,39		
	357,81	0,39		

**Tabela 64:** Resistência normalizada ao embutimento paralelo às e massa específica do *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}\text{C}}$
20	303,57	1,00	357,26	1,00
	321,57	1,00	371,13	1,00
	335,53	1,00	381,93	1,00
			404,75	1,00
40	302,37	0,91	355,34	0,97
	320,67	0,92	369,26	0,97
	334,75	0,92	382,95	0,95
			404,33	0,95
50	302,13	0,85	354,80	0,85
	320,18	0,88	369,43	0,85
	335,24	0,88	383,15	0,82
			404,27	0,82
60	297,75	0,72	364,03	0,75
	316,91	0,72	374,32	0,75
	330,20	0,74	396,84	0,71
	348,99	0,74		
70	292,26	0,83	357,46	0,86
	310,78	0,83	372,17	0,86
	324,29	0,87	391,94	0,87
	343,47	0,87		
80	294,08	0,80	356,55	0,78
	309,23	0,80	370,36	0,78
	321,12	0,78	389,63	0,79
	341,42	0,78		
90	294,88	0,79	355,13	0,84
	309,07	0,79	367,78	0,84
	324,95	0,84	385,81	0,83
	340,06	0,84		
100	293,70	0,83	352,80	0,87
	309,07	0,83	365,56	0,87
	325,41	0,86	386,85	0,86
	337,59	0,86		
	303,57	1,00	357,26	1,00

**Tabela 65:** Resistência normalizada ao embutimento paralelo às e massa específica do *Schizolobium amazonicum* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}C}$
110	293,57	0,78	351,94	0,86
	307,21	0,78	366,68	0,86
	325,10	0,88	388,71	0,87
	336,63	0,88		
130	293,34	0,84	354,32	0,83
	311,02	0,84	371,19	0,83
	328,65	0,85	392,54	0,81
	338,06	0,85		
150	294,70	0,81	356,25	0,81
	310,49	0,81	371,02	0,81
	326,60	0,82	393,04	0,79
	338,86	0,82		
170	297,25	0,92	352,10	0,94
	309,24	0,92	370,72	0,94
	330,07	0,93	395,25	0,91
	336,11	0,93		
190	297,12	0,85	352,17	0,87
	309,85	0,85	371,04	0,87
	330,65	0,86	406,63	0,86
	337,40	0,86		
210	287,50	0,66	338,74	0,66
	297,94	0,66	361,46	0,59
	318,98	0,66	393,08	0,67
	326,50	0,66		
230	281,83	0,60	335,19	0,63
	293,74	0,60	355,03	0,62
	310,63	0,60	397,48	0,65
	320,40	0,63		

**Tabela 66:** Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}\text{C}}$
20	310,30	1,00	366,78	1,00
	343,74	1,00	382,46	1,00
	356,67	1,00	403,56	1,00
			418,51	1,00
40	310,18	0,88	365,92	0,91
	341,81	0,89	380,64	0,89
	354,83	0,91	401,91	0,89
			419,72	0,89
50	309,84	0,88	365,27	0,86
	340,99	0,87	379,95	0,86
	354,10	0,86	400,85	0,89
			421,92	0,89
60	304,36	0,89	374,01	0,91
	336,39	0,88	389,82	0,90
	348,70	0,88	415,12	0,90
	360,80	0,91		
70	299,65	1,01	366,73	1,02
	329,23	1,00	386,50	1,05
	342,36	1,00	408,41	1,05
	355,38	1,02		
80	310,71	0,86	366,54	0,85
	328,72	0,85	384,60	0,84
	339,35	0,85	406,64	0,84
	353,32	0,85		
90	308,65	0,91	364,73	0,92
	326,97	0,90	381,87	0,93
	338,89	0,90	403,21	0,93
	351,96	0,92		
100	308,02	0,80	362,24	0,81
	326,65	0,81	380,62	0,80
	337,21	0,81	402,86	0,80
	352,81	0,81		
	310,30	1,00	366,78	1,00

**Tabela 67:** Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do *Schizolobium amazonicum* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m³)	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m³)	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}C}$
110	308,51	0,76	360,22	0,73
	324,79	0,75	381,77	0,74
	336,65	0,75	401,60	0,74
	352,91	0,73		
130	308,51	0,98	362,83	1,02
	327,53	0,99	383,06	0,98
	337,68	0,99	403,09	0,98
	355,30	1,02		
150	309,80	0,96	364,97	0,98
	326,70	0,95	381,82	0,97
	336,20	0,95	410,16	0,97
	355,73	0,98		
170	309,33	0,73	360,55	0,74
	326,04	0,72	378,90	0,74
	337,62	0,72	407,67	0,75
	351,62	0,74		
190	309,29	0,62	361,13	0,60
	326,79	0,61	378,32	0,60
	337,89	0,61	408,11	0,62
	352,99	0,60		
210	299,86	0,40	366,40	0,39
	317,40	0,40	394,75	0,39
	326,80	0,40		
	341,77	0,40		
	347,21	0,40		
230	301,16	0,44	367,19	0,45
	312,91	0,44	388,08	0,46
	318,55	0,44		
	334,32	0,45		
	353,49	0,45		

## Apêndice 2-4: *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*

**Tabela 68:** Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}\text{C}}$
20	373,86	1,00	370,75	1,00
	384,03	1,00	383,54	1,00
	395,88	1,00	399,71	1,00
	408,53	1,00	426,29	1,00
	416,88	1,00		
	423,40	1,00		
40	432,70	1,00		
	381,74	0,88	369,28	0,82
	392,36	0,88	384,81	0,84
	403,50	0,93	398,36	0,84
	416,18	0,93	425,87	0,84
	420,29	0,93		
50	429,66	0,93		
	373,49	0,85	368,95	0,84
	383,74	0,85	385,48	0,83
	395,77	0,85	399,22	0,83
	406,32	0,98	425,20	0,83
	416,76	0,98		
60	423,40	0,98		
	432,65	0,98		
	382,11	0,80	379,56	0,79
	394,08	0,80	388,51	0,78
	403,81	0,88	418,36	0,78
	416,20	0,88		
70	421,74	0,88		
	430,44	0,88		
	370,86	0,71	373,40	0,81
	383,19	0,71	385,77	0,82
	395,22	0,71	411,33	0,82
	403,92	0,74		
80	416,61	0,74		
	423,12	0,74		
	430,46	0,74		
	371,79	0,66	371,79	0,77
	383,27	0,66	383,89	0,78
	395,61	0,66	413,14	0,78
	405,43	0,68		
	416,72	0,68		
	423,28	0,68		
	431,39	0,68		

**Tabela 69:** Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}C}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{c0,0}/\bar{f}_{c0,20^{\circ}C}$
90	379,77	0,60	369,56	0,82
	390,41	0,60	386,40	0,86
	397,53	0,60	409,56	0,86
	414,86	0,56		
	419,76	0,56		
	429,07	0,56		
100	376,17	0,63	366,85	0,79
	384,77	0,63	384,09	0,81
	396,17	0,63	409,25	0,81
	409,39	0,63		
	417,77	0,63		
	425,89	0,63		
110	432,76	0,63		
	377,37	0,75	364,51	0,83
	385,58	0,75	387,39	0,83
	396,19	0,75	409,29	0,83
	410,72	0,73		
	417,85	0,73		
130	425,94	0,73		
	432,86	0,73		
	378,51	0,79	366,72	0,88
	387,78	0,79	389,65	0,89
	396,25	0,79	415,02	0,89
	411,67	0,82		
150	418,85	0,82		
	427,59	0,82		
	433,39	0,82		
	377,46	0,88	368,82	0,87
	387,74	0,88	389,58	0,93
	396,20	0,88	418,73	0,93
170	411,20	0,77		
	418,03	0,77		
	426,20	0,77		
	432,96	0,77		
	381,06	0,70	364,37	0,89
	391,91	0,70	386,42	0,90
	400,53	0,73	416,21	0,90
	415,72	0,73		
	420,22	0,73		
	429,47	0,73		

**Tabela 70:** Resistência normalizada à compressão paralela às fibras e massa específica do *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (continuação).

190	379,14	0,73	365,49	0,67
	388,83	0,73	386,17	0,66
	397,09	0,73	424,26	0,66
	414,52	0,72		
	419,54	0,72		
	379,14	0,73	365,49	0,67
210	428,10	0,72		
	379,10	0,59	353,53	0,53
	388,82	0,59	373,89	0,53
	396,32	0,59	412,66	0,52
	413,91	0,55		
	418,89	0,55		
230	427,66	0,55		
	433,62	0,55		
	380,49	0,40	350,71	0,38
	390,52	0,40	367,25	0,38
	399,62	0,40	406,67	0,38
	414,89	0,39		
	419,83	0,39		
	429,31	0,39		



**Tabela 71:** Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}\text{C}}$
20	365,17	1,00	370,75	1,00
	393,14	1,00	384,69	1,00
	407,63	1,00	398,95	1,00
	416,49	1,00	407,39	1,00
	426,67	1,00	418,62	1,00
40	384,86	0,85	369,16	0,98
	399,37	0,85	383,76	1,01
	412,71	1,08	398,29	1,01
	424,12	1,08	405,38	1,01
	436,53	0,87	416,84	1,01
50	387,19	0,74	368,67	0,94
	401,12	1,18	384,19	0,98
	413,13	1,18	397,34	0,98
	425,61	1,18	404,46	0,98
	437,73	0,87	415,63	0,98
60	373,93	0,81	365,22	0,91
	394,03	0,81	378,18	0,91
	408,36	0,97	390,68	0,91
	418,62	0,97	393,11	0,91
	426,88	0,97	408,60	0,91
70	369,33	0,69	371,11	0,99
	392,71	0,69	382,75	1,06
	406,84	0,89	389,55	1,06
	414,21	0,89	401,58	1,06
	426,53	0,89		
80	380,88	0,72	368,99	1,04
	395,81	0,72	381,20	1,07
	410,11	1,09	394,07	1,07
	419,97	1,09	399,59	1,07
	427,56	1,09		
90	383,13	0,78	367,67	0,94
	397,02	0,78	381,07	0,93
	411,36	0,99	391,44	0,93
	421,78	0,99	395,81	0,93
	431,80	0,99		
100	385,02	0,69	366,52	1,11
	399,95	0,69	378,30	1,11
	412,92	0,97	389,36	1,07
	424,51	0,97	412,99	1,07
	437,48	0,70		

**Tabela 72:** Resistência normalizada ao cisalhamento paralelo às fibras e massa específica do *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (continuação).

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{v0,0}/\bar{f}_{v0,20^{\circ}\text{C}}$
100	388,84	0,77	368,48	1,11
	401,86	1,01	375,85	1,11
	413,15	1,01	390,18	1,18
	426,01	1,01	411,52	1,18
	437,96	0,74		
110	384,40	0,72	370,01	0,89
	397,75	0,72	377,98	0,89
	412,47	0,90	390,87	0,93
	423,21	0,90	413,32	0,93
	434,38	0,90		
130	381,59	0,65	370,76	0,96
	396,95	0,65	380,22	0,96
	411,00	0,80	389,80	0,96
	421,26	0,80	413,22	0,96
	428,32	0,80		
150	375,54	0,51	367,99	0,71
	394,92	0,51	375,38	0,71
	409,18	0,68	387,23	0,71
	418,89	0,68	410,51	0,71
	427,30	0,68		
170	383,47	0,35	368,90	0,59
	397,18	0,35	375,55	0,60
	411,58	0,45	386,86	0,60
	422,93	0,45	409,87	0,60
	433,85	0,45		
190	378,31	0,30	359,98	0,52
	390,85	0,30	374,34	0,52
	403,73	0,37	395,43	0,51
	413,74	0,37		
	426,17	0,37		
210	384,44	0,30	357,81	0,39
	398,30	0,30	367,69	0,39
	412,55	0,32	388,90	0,38
	423,87	0,32		
	434,75	0,32		
230	388,84	0,77	368,48	1,11
	401,86	1,01	375,85	1,11
	413,15	1,01	390,18	1,18
	426,01	1,01	411,52	1,18
	437,96	0,74		

**Tabela 73:** Resistência normalizada ao embutimento paralelo às fibras e massa específica do *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e0,0}/\bar{f}_{e0,20^{\circ}\text{C}}$
20	387,88	1,00	371,13	1,00
	397,43	1,00	381,93	1,00
	408,89	1,00	404,75	1,00
	419,46	1,00		
	425,60	1,00		
	432,98	1,00		
40	385,57	0,71	369,26	0,97
	395,40	0,71	382,95	0,95
	407,93	0,74	404,33	0,95
	417,57	0,74		
	425,37	0,74		
	432,88	0,74		
50	375,47	0,72	369,43	0,85
	388,22	0,72	383,15	0,82
	403,25	0,74	404,27	0,82
	416,02	0,74		
	423,81	0,74		
	432,16	0,74		
60	388,04	0,72	364,03	0,75
	402,49	0,74	374,32	0,75
	415,78	0,74	396,84	0,71
	422,34	0,74		
	431,49	0,74		
	436,29	0,75		
70	386,56	0,72	357,46	0,86
	400,45	0,76	372,17	0,86
	415,10	0,76	391,94	0,87
	421,69	0,76		
	428,86	0,76		
	435,26	0,79		
80	385,07	0,74	356,55	0,78
	400,06	0,77	370,36	0,78
	411,68	0,77	389,63	0,79
	420,96	0,77		
	427,48	0,77		
	434,75	0,77		
90	386,51	0,76	355,13	0,84
	400,31	0,71	367,78	0,84
	414,16	0,71	385,81	0,83
	421,03	0,71		
	427,72	0,71		
	435,02	0,76		

**Tabela 74:** Resistência normalizada ao embutimento paralelo às fibras e massa específica do *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (continuação).

100	383,12	0,72	352,80	0,87
	397,96	0,72	365,56	0,87
	409,72	0,71	386,85	0,86
	420,15	0,71		
	425,85	0,71		
	433,76	0,71		
110	387,36	0,68	351,94	0,86
	401,77	0,68	366,68	0,86
	415,43	0,68	388,71	0,87
	421,95	0,68		
	430,28	0,62		
	435,54	0,63		
130	384,04	0,77	354,32	0,83
	398,81	0,77	371,19	0,83
	411,02	0,78	392,54	0,81
	420,63	0,78		
	426,91	0,78		
	434,16	0,78		
150	384,84	0,93	356,25	0,81
	393,97	0,93	371,02	0,81
	407,57	0,91	393,04	0,79
	417,13	0,91		
	424,62	0,91		
	432,55	0,91		
170	383,70	0,86	352,10	0,94
	398,61	0,86	370,72	0,94
	410,67	0,85	395,25	0,91
	420,17	0,85		
	426,70	0,85		
	433,88	0,85		
190	384,50	0,84	352,17	0,87
	399,81	0,84	371,04	0,87
	411,13	0,86	406,63	0,86
	420,66	0,86		
	427,00	0,86		
	434,61	0,86		
210	381,93	0,68	361,46	0,59
	397,73	0,68	393,08	0,67
	409,28	0,68		
	419,60	0,68		
	425,65	0,68		
	433,59	0,68		
230	381,52	0,51	355,03	0,62
	390,26	0,51	397,48	0,65
	406,09	0,53		
	416,39	0,53		
	423,95	0,53		

**Tabela 75:** Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}\text{C}}$	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_{e90,0}/\bar{f}_{e90,20^{\circ}\text{C}}$
20	387,23	1,00	366,78	1,00
	393,74	1,00	382,46	1,00
	403,20	1,00	403,56	1,00
	408,58	1,00	418,51	1,00
	421,89	1,00		
	432,16	1,00		
40	387,84	0,80	365,92	0,91
	394,24	0,80	380,64	0,89
	403,47	0,83	401,91	0,89
	408,99	0,83	419,72	0,89
	423,05	0,83		
	432,25	0,83		
50	388,05	0,80	365,27	0,86
	395,81	0,80	379,95	0,86
	404,48	0,83	400,85	0,89
	409,99	0,83	421,92	0,89
	424,19	0,83		
	433,07	0,83		
60	385,50	0,78	360,80	0,91
	392,49	0,78	374,01	0,91
	401,79	0,82	389,82	0,90
	407,86	0,82	415,12	0,90
	418,89	0,82		
	431,23	0,82		
70	380,52	0,82	366,73	1,02
	390,93	0,82	386,50	1,05
	399,69	0,82	408,41	1,05
	407,00	0,83		
	416,98	0,83		
	428,33	0,83		
80	382,90	0,68	366,54	0,85
	392,15	0,68	384,60	0,84
	400,65	0,71	406,64	0,84
	407,25	0,71		
	418,48	0,71		
	430,99	0,71		
90	386,39	0,78	364,73	0,92
	392,68	0,78	381,87	0,93
	403,14	0,84	403,21	0,93
	407,98	0,84		
	420,02	0,84		
	431,96	0,84		

**Tabela 76:** Resistência normalizada ao embutimento perpendicular às fibras e massa específica do *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (continuação).

100	369,81	0,73	362,24	0,81
	388,27	0,73	380,62	0,80
	395,82	0,73	402,86	0,80
	405,22	0,80		
	411,11	0,80		
110	424,87	0,80		
	378,34	0,56	360,22	0,73
	390,63	0,56	381,77	0,74
	398,03	0,56	401,60	0,74
	405,90	0,54		
130	414,10	0,54		
	428,02	0,54		
	382,22	0,74	362,83	1,02
	391,10	0,74	383,06	0,98
	400,53	0,82	403,09	0,98
150	407,02	0,82		
	417,11	0,82		
	430,78	0,82		
	373,89	0,79	364,97	0,98
	389,88	0,79	381,82	0,97
170	397,47	0,79	410,16	0,97
	405,55	0,81		
	411,69	0,81		
	427,86	0,81		
	379,44	0,79	360,55	0,74
190	390,66	0,79	378,90	0,74
	398,10	0,79	407,67	0,75
	406,50	0,89		
	414,75	0,89		
	428,08	0,89		
210	388,00	0,41	361,13	0,60
	395,00	0,41	378,32	0,60
	404,23	0,43	408,11	0,62
	409,92	0,43		
	423,12	0,43		
230	432,35	0,43		
	373,15	0,47	347,21	0,40
	389,47	0,47	366,40	0,39
	396,34	0,47	394,75	0,39
	405,29	0,47		
	411,12	0,47		
	427,53	0,47		
	379,62	0,48	353,49	0,45
	390,89	0,48	367,19	0,45
	399,12	0,48	388,08	0,46
	406,78	0,50		
	415,82	0,50		

### Apêndice 3: Resistência mecânica.

**Tabela 77:** Valores médios de resistência mecânica do *Pinus taeda*.

Temperatura (°C)	Resistência mecânica (MPa)				
	$\bar{f}_{c0,0}$	$\bar{f}_{m,0}$	$\bar{f}_{v,0}$	$\bar{f}_{e0,0}$	$\bar{f}_{e90,0}$
20	24,33	60,34	4,51	26,86	12,02
40	21,82	48,95	4,37	20,88	11,84
50	21,94	53,00	4,13	19,78	10,26
60	19,76	51,16	3,57	20,77	9,51
70	17,05	48,85	3,36	19,30	9,06
80	14,81	48,98	3,81	21,27	8,05
90	13,86	51,94	3,58	19,96	9,34
100	14,49	52,36	3,70	19,96	9,25
110	17,00	44,63	3,79	18,26	7,42
130	17,88	46,77	3,41	22,42	9,39
150	18,65	46,46	2,98	25,76	9,10
170	17,18	39,06	2,39	23,32	10,30
190	17,20	30,31	1,71	22,53	5,40
210	15,47	28,23	1,44	18,34	5,36
230	9,56	21,23	1,53	15,46	5,55

**Tabela 78:** Valores médios de resistência mecânica do *Eucalyptus saligna*.

Temperatura (°C)	Resistência mecânica (MPa)				
	$\bar{f}_{c0,0}$	$\bar{f}_{m,0}$	$\bar{f}_{v,0}$	$\bar{f}_{e0,0}$	$\bar{f}_{e90,0}$
20	51,12	72,19	7,95	64,67	29,07
40	39,97	64,15	6,44	55,88	22,68
50	39,61	63,08	5,47	45,27	20,88
60	35,33	57,26	5,13	46,59	18,60
70	31,76	50,45	4,55	41,08	19,56
80	30,07	56,87	4,34	41,76	17,52
90	25,67	54,34	4,13	40,23	17,99
100	23,44	46,05	4,35	38,75	17,92
110	21,41	46,61	4,06	39,05	16,06
130	22,58	50,85	4,67	51,64	13,32
150	26,36	44,89	4,51	48,23	19,23
170	21,83	39,62	3,89	50,69	18,57
190	22,79	39,03	2,58	44,58	13,63
210	21,63	25,17	1,82	41,11	17,14
230	17,27	17,95	1,28	38,88	11,82

**Tabela 79:** Valores médios de resistência mecânica do *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	Resistência mecânica (MPa)			
	$\bar{f}_{c0,0}$	$\bar{f}_{v,0}$	$\bar{f}_{e0,0}$	$\bar{f}_{e90,0}$
20	32,27	2,86	29,49	13,16
40	28,17	2,79	26,23	11,91
50	26,98	2,77	25,94	10,45
60	25,40	2,98	23,33	9,95
70	25,33	2,81	26,53	9,88
80	24,80	2,88	22,28	8,29
90	26,68	2,64	24,29	9,98
100	24,88	3,25	23,18	9,10
110	25,94	3,13	21,94	7,85
130	27,06	2,73	24,96	9,52
150	29,17	2,54	25,61	9,06
170	27,53	2,20	28,29	10,46
190	22,61	1,71	25,12	5,55
210	14,12	1,54	16,08	4,95
230	11,32	1,01	17,90	5,71

**Apêndice 4:** Valores característicos normalizados.**Tabela 80:** Valores característicos normalizados do *Pinus taeda*.

Temperatura (°C)	$f_{c0k,0} / f_{c0k,20^{\circ}C}$	$f_{mk,0} / f_{mk,20^{\circ}C}$	$f_{vk,0} / f_{vk,20^{\circ}C}$	$f_{e0k,0} / f_{e0k,20^{\circ}C}$	$f_{e90k,0} / f_{e90k,20^{\circ}C}$
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
40	0,90	0,76	0,97	0,76	0,90
50	0,90	0,84	0,92	0,76	0,85
60	0,81	0,77	0,76	0,77	0,86
70	0,71	0,72	0,73	0,68	0,81
80	0,60	0,77	0,86	0,80	0,73
90	0,55	0,80	0,80	0,73	0,82
100	0,56	0,81	0,83	0,72	0,83
110	0,69	0,64	0,88	0,65	0,67
130	0,71	0,72	0,75	0,84	0,84
150	0,76	0,72	0,69	0,98	0,82
170	0,69	0,64	0,55	0,85	0,93
190	0,69	0,45	0,38	0,82	0,48
210	0,62	0,42	0,32	0,70	0,48
230	0,38	0,36	0,32	0,59	0,50



**Tabela 81:** Valores característicos normalizados do *Eucalyptus saligna*.

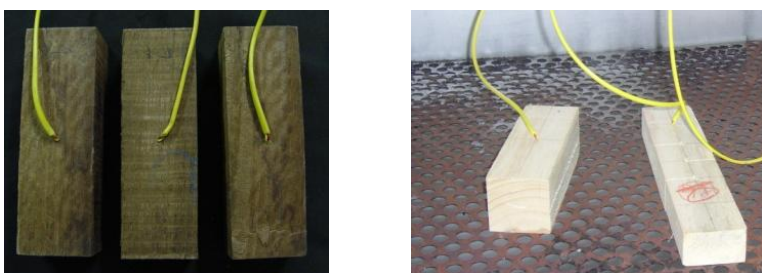
Temperatura (°C)	$f_{c0k,\theta}$ $/f_{c0k,20^{\circ}C}$	$f_{mk,\theta}$ $/f_{mk,20^{\circ}C}$	$f_{vk,\theta}$ $/f_{vk,20^{\circ}C}$	$f_{e0k,\theta}$ $/f_{e0k,20^{\circ}C}$	$f_{e90k,\theta}$ $/f_{e90k,20^{\circ}C}$
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
40	0,78	0,88	0,83	0,87	0,73
50	0,76	0,87	0,67	0,70	0,65
60	0,70	0,77	0,65	0,73	0,63
70	0,62	0,67	0,58	0,62	0,65
80	0,59	0,77	0,56	0,67	0,58
90	0,51	0,73	0,54	0,62	0,61
100	0,46	0,60	0,56	0,57	0,57
110	0,42	0,64	0,51	0,61	0,55
130	0,45	0,66	0,60	0,82	0,44
150	0,48	0,60	0,57	0,77	0,67
170	0,44	0,50	0,49	0,80	0,58
190	0,44	0,50	0,30	0,70	0,44
210	0,26	0,32	0,21	0,62	0,56
230	0,21	0,28	0,16	0,59	0,38

**Tabela 82:** Valores característicos normalizados do *Schizolobium amazonicum*.

Temperatura (°C)	$f_{c0k,\theta}$ $/f_{c0k,20^{\circ}C}$	$f_{vk,\theta}$ $/f_{vk,20^{\circ}C}$	$f_{e0k,\theta}$ $/f_{e0k,20^{\circ}C}$	$f_{e90k,\theta}$ $/f_{e90k,20^{\circ}C}$
20	1,00	1,00	1,00	1,00
40	0,82	0,98	0,87	0,85
50	0,84	0,97	0,89	0,83
60	0,79	1,05	0,80	0,86
70	0,79	0,98	0,88	0,77
80	0,78	1,03	0,77	0,68
90	0,81	0,93	0,80	0,83
100	0,79	1,13	0,85	0,67
110	0,82	1,10	0,78	0,63
130	0,85	0,96	0,85	0,75
150	0,92	0,89	0,87	0,76
170	0,88	0,78	0,99	0,79
190	0,69	0,60	0,78	0,45
210	0,41	0,54	0,49	0,36
230	0,30	0,35	0,58	0,42

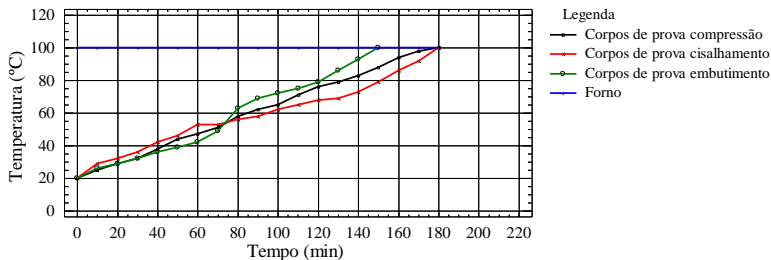
### **Apêndice 5:** Determinação do tempo de aquecimento dos corpos de prova

O aquecimento dos corpos de prova foi realizado em um forno elétrico com dimensões internas de 90 cm × 100 cm × 66 cm e controle automático de temperatura. O tempo de aquecimento foi determinado a partir de ensaios em corpos de prova de teste. O tempo necessário de exposição ao calor para que a temperatura no interior dos corpos de prova atingisse a temperatura do forno, regulada em 200 °C. A estabilização e o nível da temperatura foram verificados por meio de um termopar do tipo K, inserido em um orifício de 2,0 mm de diâmetro, cuja base localizava-se no centro geométrico do corpo de prova (**Figura 86**). Foi considerada a temperatura máxima de ensaio 230 °C, devido à combustibilidade da madeira associada ao tempo de aquecimento adotado (MANRÍQUEZ; MORAES 2009).

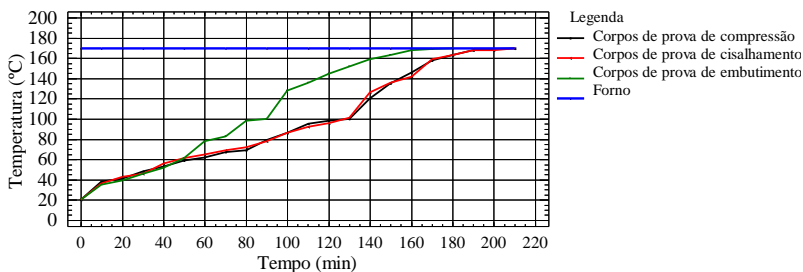


**Figura 86:** Controle de temperatura dos corpos de prova.

As **Figuras 87 e 88** apresentam o controle de temperatura no de aquecimento dos corpos de prova para os ensaios à compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e ao embutimento paralelo e perpendicular às fibras. O tempo de aquecimento para os corpos de prova de flexão estática foram aquecido a mesmo tempo determinado para os ensaios de embutimento.



**Figura 87:** Aquecimento do *Pinus taeda*.



**Figura 88:** Aquecimento do *Eucalyptus saligna*.